




Image forming apparatus and method for correcting optical geometrical distortions in an image

Patent number: EP0720125
Publication date: 1996-07-03
Inventor: FLORENT RAOUL (FR); LELONG PIERRE (FR)
Applicant: PHILIPS ELECTRONIQUE LAB (FR); PHILIPS ELECTRONICS NV (NL)
Classification:
 - **International:** G06T5/00
 - **European:** G06T5/00G
Application number: EP19950203550 19951219
Priority number(s): FR19940015872 19941229

Also published as:

 US5675380 (A1)
 JP8287243 (A)
 EP0720125 (B1)

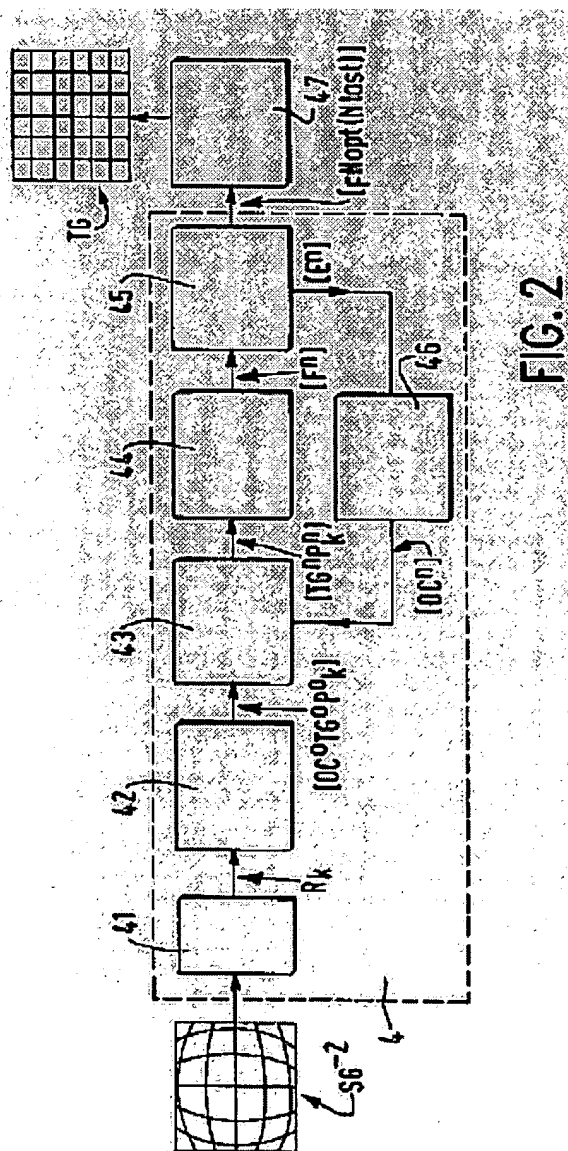
Cited documents:

 EP0479618

Report a data error here

Abstract of EP0720125

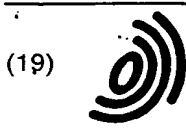
The system forms an image (SG) from a source image (M) using a shooting system (1), data capture unit (2) and numerising unit (3). The image becomes distorted by the shooting system. A numerical system of image processing (4, 47) corrects the distorted image (SG) to a corrected target image (TG). The image processing system (4, 47) has a first sub-assembly (4) which determines the optical centre (OCn) of distortion from a test source and also a polynomial function of correction (FNopt/NLast). A second sub-assembly (47) has a memory to stock these data and a calculation block to apply them.



THIS PAGE BLANK (USPTO)

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide

THIS PAGE BLANK (USPTQ)



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11) EP 0 720 125 A1

(12) DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:
03.07.1996 Bulletin 1996/27

(51) Int Cl.⁶: G06T 5/00

(21) Numéro de dépôt: 95203550.9

(22) Date de dépôt: 19.12.1995

(84) Etats contractants désignés:
DE FR GB IE

(30) Priorité: 29.12.1994 FR 9415872

(71) Demandeurs:
• LABORATOIRES D'ELECTRONIQUE PHILIPS
S.A.S.
94450 Limeil-Brévannes (FR)
Etats contractants désignés:
FR
• PHILIPS ELECTRONICS N.V.
5621 BA Eindhoven (NL)
Etats contractants désignés:
DE GB IE

(72) Inventeurs:
• Florent, Raoul, Société Civile S.P.I.D.
F-75008 Paris (FR)
• Lelong, Pierre, Société Civile S.P.I.D.
F-75008 Paris (FR)

(74) Mandataire: Lottin, Claudine
Société Civile S.P.I.D.
156, Boulevard Haussmann
F-75008 Paris (FR)

(54) Dispositif de formation d'image et procédé pour effectuer des corrections de distorsions optiques géométriques dans une image

(57) Le dispositif comprend des systèmes de prise de vue (1), de saisie (2) et de numérisation (3) d'une image source (SI) distordue, un système de traitement d'image numérique (4,47) de construction d'une image cible (TI) corrigée en distorsions, correspondant à l'image source (SI), lequel inclut un premier sous-ensemble (4) de détermination préalable à partir des données d'une image source TEST distordue (SG⁰), d'un centre optique (OCⁿ) et d'une fonction polynomiale (Fⁿ) de correction des distorsions radiales autour de ce centre optique et un second sous-ensemble (47) qui applique ladite fonction polynomiale de correction à chaque adresse de pixel de l'image cible (TI) pour fournir l'adresse d'un point dans l'image source distordue (SI) où trouver une donnée d'intensité à appliquer à l'adresse de départ dans l'image cible.

Le procédé comprend le calcul, dans une image source TEST (SG⁰), d'un centre optique (OCⁿ) au centre des distorsions optiques, et d'une fonction polynomiale (Fⁿ) de correction des distorsions pour construire une image cible TEST (TI).

Application : systèmes d'imagerie vidéo ou numérique

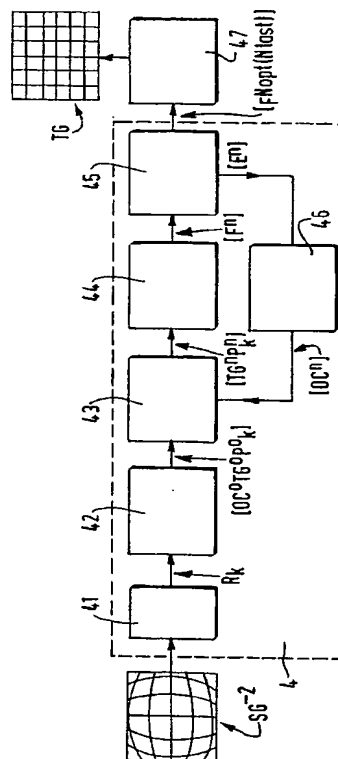


FIG. 2

EP 0 720 125 A1

Description

L'invention concerne un dispositif de formation d'image comprenant :

5 un système de prise de vue,
un système de saisie des données d'une image source distordue par le système de prise de vues,
un système de numérisation de ladite image source incluant une première mémoire d'image pour le stockage des
données d'intensité de chaque pixel repéré par une adresse dans une matrice bidimensionnelle,
10 un système de traitement d'image numérique construction d'une image cible corrigée en distorsions, correspondant
à l'image source.

L'invention concerne également un procédé pour effectuer des corrections de distorsions optiques géométriques
produites par un dispositif de prise de vue dans une image.

L'invention trouve son application dans la correction des images numérisées dans le domaine des systèmes à R-
15 X, ou bien des systèmes vidéo, ou bien des systèmes d'imagerie numériques.

Des distorsions géométriques significatives peuvent être introduites par l'objectif d'une caméra dans l'image pro-
duite par cette caméra, tout particulièrement, si cet objectif est du type grand-angle. Ces distorsions géométriques
sont le plus souvent du type dit en tonneau, ou du type dit en coussin. Ces distorsions géométriques apparaissent
même si l'objectif de la caméra est de très bonne qualité.

20 Il est déjà connu de l'état de la technique par la demande de brevet GB 2 256 989 un dispositif pour réaliser une
compensation des imperfections optiques dans une caméra de télévision.

Ce dispositif comprend une caméra de prise de vue d'enregistrement de l'image formée par le système optique,
et des moyens pour numériser cette image qui incluent le stockage des données d'intensité de chaque pixel courant.

25 Ce dispositif comprend en outre un correcteur d'erreur pour compenser les erreurs géométriques, d'enregistre-
ment, et chromatiques et compenser ainsi les imperfections optiques du système de prise de vue à lentille.

Ce correcteur d'erreur est commandé par un contrôleur de correction. Ce contrôleur de correction reçoit, via une
interface, des informations extérieures, appropriées à le programmer pour qu'il fournisse au correcteur d'erreur des
signaux de contrôle qui prennent en compte des paramètres du système de prise de vue. Dans ces conditions, le
correcteur d'erreur est capable de corriger les données des pixels.

30 Dans le correcteur d'erreur, une mémoire cartographique reçoit du contrôleur de correction ces signaux de contrôle
dépendant des paramètres du système de prise de vue. Cette mémoire cartographique est tabulée en fonction de ces
paramètres de manière à définir la cartographie qu'il est nécessaire d'utiliser pour corriger les défauts du système
optique avec un type de lentille donné et dans des conditions de prise de vue données.

35 La sortie de la mémoire cartographique est fournie à un interpolateur utilisé pour améliorer la définition de l'image
de sortie.

La mémoire cartographique est calibrée en fournissant à la caméra de prise de vue une MIRE de test ayant un
dessin de grille carrée régulière, et en ajustant manuellement les paramètres stockés, de manière à obtenir en sortie
du dispositif une grille corrigée. Cette opération peut être réalisée en affichant par exemple la sortie du dispositif sur
un écran muni d'un graticule superposé.

40 Le dispositif connu du brevet GB 2 256 989 n'opère donc pas les corrections des imperfections du système de
prise de vue de manière automatique. Il faut lui fournir des données sur la distance focale de la lentille, la distance de
prise de vue, et le taux de zoom utilisé. Il faut en outre entrer dans une mémoire cartographique, pour chaque type de
lentille et chaque condition de prise de vue, des tableaux dans lesquels seront puisées les informations relatives aux
nouvelles adresses à affecter aux pixels de l'image cible, pour remplacer les adresses d'origine de ces pixels dans
45 l'image source c'est-à-dire dans l'image directement issue du système de prise de vue et entachée d'imperfections.
Ainsi l'image cible peut être corrigée des distorsions de l'image source.

Aucun moyens automatiques de tabulation de la mémoire cartographique, ou moyens automatiques pour calculer
des fonctions de correction à appliquer aux pixels de l'image source, pour obtenir les pixels de l'image cible ne sont
enseignés par le document cité. Seuls des moyens de calibration manuels de la mémoire cartographique sont divul-
gués, incluant la superposition de l'image cible distordue d'une grille sur un graticule de référence et la correction par
50 l'action manuelle sur des paramètres d'entrée du système de prise de vue.

Un but de la présente invention est de proposer un dispositif, ainsi qu'un procédé, pour calculer des fonctions de
correction des distorsions optiques d'un système de prise de vue, pour obtenir des données de pixels permettant de
construire une image cible corrigée.

55 Un but de la présente invention est de proposer un tel dispositif et un tel procédé pour calculer automatiquement
de telles fonctions de correction sans avoir à tenir compte des paramètres du système de prise de vue.

Ces buts sont atteints au moyen d'un dispositif tel que défini dans le préambule de la partie introductive, dans
lequel, le système de traitement d'image inclut :

un premier sous-ensemble, de détermination préalable à partir des données d'image d'une image source TEST distordue, d'un centre optique et d'une fonction polynomiale de correction des distorsions radiales autour de ce centre optique,

un second sous-ensemble incluant une mémoire de stockage du centre optique et de la fonction polynomiale déterminés par le premier sous-ensemble, un bloc de calcul qui applique la fonction polynomiale de correction à chaque adresse de pixel de l'image cible pour fournir l'adresse d'un point dans l'image source distordue où trouver une donnée d'intensité à appliquer à l'adresse de départ dans l'image cible, et une seconde mémoire d'image pour le stockage des données de l'image cible reconstruite.

Un procédé pour effectuer des corrections de distorsions optiques produites par un système de prise de vue, dans une image, comprend des étapes préliminaires de :

a) saisie des données et numérisation d'une image source TEST incluant le stockage des données d'intensité de chaque pixel,

b) estimation d'un centre optique localisé au mieux au centre des distorsions optiques de l'image source TEST et report de ce centre optique calculé dans une image numérique à construire, référencée image TEST cible, représentant l'image source TEST corrigée des distorsions optiques,

c) estimation d'une fonction polynomiale pour faire correspondre à l'adresse d'un pixel dans l'image TEST cible corrigée, l'adresse d'un point correspondant noté point de référence, dans l'image source distordue, en se fondant sur l'hypothèse de base que les distorsions optiques géométriques dans l'image source sont radiales autour du centre de distorsion, de sorte que lesdits points correspondants sont alignés au mieux avec le centre optique estimé.

Un tel procédé peut en outre comprendre dans les étapes préliminaires, des étapes itératives de :

d) estimation de la meilleure fonction polynomiale $F^{N_{opt}}$ capable de minimiser, à une itération d'ordre N_{opt} , l'erreur de modélisation réalisée sur la localisation des pixels de l'image test cible construite à une itération précédente selon l'hypothèse des distorsions radiales autour d'un centre optique OC^n estimé à ladite itération précédente,

e) estimation, à une itération d'ordre N_{last} , d'un centre optique modifié optimisé $OC^{N_{last}}$ et réestimation dans ces conditions d'une nouvelle fonction polynomiale $F^{N_{opt}(N_{last})}$ capable de minimiser davantage l'erreur de modélisation réalisée sur la localisation des pixels de l'image cible reconstruite selon l'hypothèse des distorsions radiales autour dudit meilleur centre optique $OC^{N_{last}}$ estimé.

L'invention est décrite ci-après en détail, en référence avec les figures schématiques annexées dont :

- la FIG.1A qui représente un dispositif de formation d'images incluant un système de prise de vue et deux sous-ensembles d'un système de traitement d'images numériques, l'un pour déterminer et l'autre pour appliquer des lois de corrections géométriques des distorsions optiques du système de prise de vue ;
- les FIG.1B et 1C qui illustrent l'étape de calibrage pour l'acquisition d'une mire de test par le système de prise de vue ;
- la FIG.2 qui représente un diagramme schématique de blocs formant le premier sous-ensemble du système de traitement d'image, pour mettre en oeuvre un procédé de détermination de lois de corrections et de détermination du centre de distorsion, pour corriger géométriquement les distorsions optiques provoquées par le système de prise de vue ;
- les FIG.3A à 3G qui représentent des images source et cible dans les différentes étapes du procédé ;
- la FIG.4A qui représente une intersection dans la grille source et illustre le filtrage non linéaire pour extraire les points de référence ;
- la FIG.4B qui représente une intersection dans la grille source pour la détermination du point de référence R_k^0 le plus proche du centre de distorsion, par un critère d'alignement ;
- la FIG.4C qui représente un sous-ensemble horizontal HS_k^0 de points de référence pour la détermination du pas de la première grille TG^0 , par un premier filtrage médian ;
- la FIG.4D qui représente un sous-ensemble central S_k^0 de points de référence pour la détermination du pas de la première grille théorique TG^0 , par un second filtrage médian ;
- la FIG.4E qui illustre la formation de couronnes rectangulaires de taille croissance, pour la formation des couples p_k^0 ;
- les FIG.5A et 5B qui représentent des images sources distordues en coussin et en tonneau respectivement ;
- la FIG.6A qui illustre la mise en correspondance d'un point de grille $TR_{g(k\alpha)}^0$ et d'un point de référence $R_{f(k\alpha)}$ dans une couronne rectangulaire α , et la FIG.6B qui illustre la même opération dans une couronne adjacente plus

grande β ;

- la FIG. 7A qui illustre la détermination des erreurs Δ_k^n d'alignement des couples P_k^n sur le centre optique OC^n , ces erreurs étant dues à la distorsion ;
- la FIG. 7B qui illustre la détermination des couples de rayons X_k^n et Y_k^n pour l'estimation de la fonction polynomiale F^n ;
- la FIG. 7C représente les points des couples P_k^{Nlast} idéalement alignés avec le centre OC^{Nlast} qui minimise au mieux l'erreur de modélisation ;
- la FIG. 8A qui illustre la détermination d'un polynôme F^n pour relier au mieux les points formés par les couples de rayons X_k^n et Y_k^n reportés respectivement en abscisse et en ordonnée sur un graphe dans un repère gradué en pixels d'origine OC^n ;
- la FIG. 8B qui illustre la détermination du premier polynôme F^0 à l'itération zéro dans la méthode itérative et la FIG. 8C illustre la détermination d'un polynôme amélioré F^m à une itération n ultérieure ;
- la FIG. 8D qui montre les points des couples P_k^{Nlast} idéalement placés sur la courbe représentative du meilleur polynôme $F^{Nlast(Nopt)}$ pour minimiser l'erreur de modélisation.

I - DISPOSITIF (Fig. 1A, Fig. 2)

D'une manière générale, un système de prise de vue de caméra peut inclure un système optique à lentille de type grand angle, ou bien un système de lentilles de type zoom qui produisent des distorsions optiques géométriques dans l'image formée par cette caméra. Ces distorsions apparaissent même si le système optique est de très bonne qualité.

En référence avec la FIG. 1A, un dispositif de formation d'image comprend un système de prise de vue 1 ayant un système optique à lentilles, qui fournit une image distordue d'une scène. Ce système optique 1 à lentille est attaché à une caméra 2 qui convertit l'image optique en signaux électriques grâce à un élément à CCD par exemple. Ces signaux électriques sont fournis à un système de numérisation 3 capable de stocker les données d'image numérisées c'est-à-dire les données d'intensité relatives à chaque adresse des pixels de l'image repérés dans une matrice bidimensionnelle, dans une première mémoire d'images. Ces données d'image numérisée sont relatives à l'image distordue.

Ce dispositif de formation d'images comprend aussi un système de traitement de signal numérique qui comprend un sous-ensemble 47 qui traite les données d'image numérisées stockées dans la mémoire d'image du système de numérisation 3 pour fournir des données d'une image numérique correspondante, reconstruite avec correction des distorsions, ces données étant finalement stockées dans une seconde mémoire d'image.

On appellera ci-après image source SI les données d'image numériques en sortie du système de numérisation 3 relatives à une image distordue par le système de prise de vue, et image cible TI les données d'images numériques fournies par le sous-ensemble 47 du système de traitement d'image, relatives à l'image reconstruite corrigée en distorsion.

Le sous-ensemble 47 du système de traitement d'image comprend, stockées dans une puce ou dans une table (LOOK UP TABLE) des lois de correction des distorsions pour construire l'image cible corrigée TI. Ces lois doivent être déterminées au moyen d'un procédé comprenant des étapes préliminaires. Un des buts de l'invention est de fournir un tel procédé pour déterminer ces lois de corrections de manière automatique. Les lois de corrections sont déterminées une fois pour toutes dans un premier sous-ensemble 4 du système de traitement. Ensuite, elles sont appliquées automatiquement au moyen du sous-ensemble 47 du système de traitement d'image appelé second sous-ensemble 47. L'interrupteur INT sur la FIG. 1A permet de mettre hors circuit le premier sous-ensemble 4 du système de traitement, lorsque ces lois ont été déterminées.

On décrit ultérieurement le procédé de détermination des lois de correction mis en oeuvre dans le premier sous-ensemble 4 du système de traitement d'image. Ce premier sous-ensemble 4 pourra aussi être une extension du système de numérisation 3, ou être intégré dans ce système de numérisation 3.

Dans le dispositif de formation d'image selon l'invention, tel que représenté sur les FIG. 1A et 2 :

a/ Dans le premier sous-ensemble 4 du système de traitement, on met en oeuvre : des étapes de calcul pour déterminer une fois pour toutes :

- * des lois de correction géométriques des distorsions produites par le système 1 de prise de vue,
- * et la localisation précise du centre des distorsions géométriques, qui est aussi le centre optique du système à lentilles de la caméra, dans la plupart des cas.

b/ Dans le second sous-ensemble 47 du système de traitement, on met en oeuvre des étapes de calcul, pour construire, aux moyens des lois précédentes et de la connaissance du centre de distorsion, pour chaque image source SI distordue, une image cible TI corrigée en distorsion.

On décrit ci-après :

- * une méthode pour déterminer ces lois de correction des distorsions géométriques et pour déterminer de façon concomitante la localisation précise du centre de distorsion, mise en oeuvre dans le premier sous-ensemble 4,
- * une méthode pour construire l'image cible T1 en utilisant ces connaissances, mise en oeuvre dans le second sous-ensemble 47.

II/ METHODE POUR DETERMINER LES LOIS DE CORRECTION ET LE CENTRE DE DISTORSION (FIG.1, bloc 4 : FIG.2, blocs 41 à 46)

Un procédé pour déterminer de manière concomitante ces lois de correction et les coordonnées précises du centre de distorsion est décrit ci-après, en référence avec la FIG.2 qui en représente les différentes étapes par un diagramme schématique de blocs.

Ce procédé ne nécessite aucune mesures préliminaires telle que la mesure de la distance focale, ou la mesure de la distance de prise de vue, ou la mesure réelle du pas d'une grille test.

Ce procédé repose sur l'utilisation de l'hypothèse que les distorsions géométriques engendrées par le système de prise de vue sont radiales, c'est-à-dire que, dans l'image cible construite par le second sous-ensemble 47 du système de traitement, un point corrigé doit se trouver sur un rayon déterminé par le point distordu et par le centre de distorsion. C'est pourquoi ce procédé nécessite, en plus de la détermination des lois de correction, la détermination précise concomitante du centre de distorsion. Néanmoins ce procédé ne nécessite aucune mesure réelle précise préliminaire. Dans ce procédé, on ne cherchera pas à mesurer précisément, par un senseur par exemple, la localisation du **centre optique de la caméra**, puisque seul le centre de distorsion de l'image source est intéressant, du fait que les distorsions sont radiales autour du centre de distorsion.

En référence avec la FIG.2, ce procédé mis en oeuvre dans le premier sous-ensemble 4 comprend au moins les étapes suivantes :

II. A/ ACQUISITION D'UNE MIRE

Cette étape comprend les sous-étapes suivantes.

II.A1/ Construction d'une mire (FIG.1A)

On réalise une mire de test M.

On choisit de préférence à cet effet de réaliser le dessin d'une grille sur un support plan rigide. Les mailles de cette grille peuvent être carrées ou rectangulaires. Dans un exemple, cette mire peut être un dessin sur un support à fond blanc d'1m x 1.50m, représentant des barreaux noirs horizontaux et verticaux formant des mailles carrées comme montré en M sur la FIG.1A.

II.A2/ Calibrage de la caméra (FIG.1B, FIG.1C, FIG.3A)

On place la caméra face au plan de la mire M pour faire l'acquisition d'une image nette de cette mire. Un calibrage est réalisé avant d'effectuer la prise de vue. Ce calibrage consiste à :

- * rendre le support plan de la mire M perpendiculaire à l'axe optique X'X de la caméra de prise de vue, comme illustré par la FIG.1B ;
- * rendre les barreaux de la grille parallèles aux lignes et aux colonnes de l'élément à CCD de la caméra 2, comme illustré par la FIG.1C ;
- * placer le plan support de la grille de telle sorte que tout le plan image de la caméra soit couvert par des mailles de grille, comme illustré par la FIG.3A.

Les conditions de calibrage consistent donc essentiellement à vérifier trois conditions d'orthogonalité, deux de ces conditions d'orthogonalité étant vérifiées lorsque l'axe optique X'X de la caméra est perpendiculaire au plan de la mire, et la troisième lorsque les barreaux de la grille de mire sont parallèles respectivement aux lignes et colonnes orthogonales de l'élément à CCD de la caméra.

L'opération de calibrage peut être effectuée en utilisant simplement des équerres. Ce calibrage n'est pas contraignant car il apparaît que le procédé selon l'invention est très robuste à d'éventuelles imperfections de ce calibrage.

II.A3/ Acquisition d'une image de la grille servant de mire (FIG.1A et FIG.3A), référencée grille source

A l'aide de la caméra 2, munie de son système optique à lentilles 1, on effectue une mise au point et une prise de vue de la grille servant de mire M. Le système de numérisation 3 en fournit une image numérisée sous forme d'une grille, appelée grille source SG⁻², montrant des distorsions optique comme représentée sur la FIG.3A.

Les distorsions peuvent être en forme de coussin comme sur la FIG.5A, ou en forme de tonneaux comme sur les FIG.5B et 3A.

II.E/ EXTRACTION DE POINTS DE REFERENCE R_k (FIG.2, bloc 41)

Une image de la grille source distordue est numérisée et stockée dans les moyens de numérisation et stockage 3 montrés sur la FIG. 1.

En référence avec la FIG.3A, **dans l'image de la grille source SG⁻² numérisée**, on appelle ci-après "**points de référence**" R_k des points d'intersection des barreaux verticaux et horizontaux de cette grille source distordue SG⁻². Par horizontal et vertical, on entend parallèles aux lignes et aux colonnes de l'élément à CCD de la caméra, comme il résulte du calibrage.

En ce qui concerne les notations :

- * pour les points de référence R_k , k est un indice qui permet de numérotter les points de référence de la grille source ; ces numéros peuvent être 1 à 500 par exemple,
- * pour les images de la grille source, par exemple SG⁻², l'exposant permet de numérotter l'étape du traitement d'image. Ici l'exposant (-2) indique que cette étape est la deuxième avant celle qui fournira l'image de grille source SG⁰ des lois et du centre recherchés.

En référence avec la FIG.2, la chaîne des opérations formant les étapes du procédé selon l'invention, comprend une première étape mise en oeuvre dans le bloc 41, consistant en l'extraction des points de référence R_k de l'image de la grille source SG⁻², par la détermination de leur adresse dans cette image source au moyen des sous-étapes suivantes :

- * un filtrage de l'image source pour rehausser l'intensité des zones d'intersection,
- * un seuillage de l'image filtrée ;
- * une labellisation des points seuillés pour former des zones, et une extraction du barycentre de chaque zone.

II.B1/ Rehaussement du niveau d'intensité des zones d'intersection par filtrage (FIG.3B : FIG.2, bloc 41)

Dans le cas pris comme exemple où les barreaux de la grille mire sont représentés en noir sur fond blanc ou clair, les zones d'intersection des barreaux verticaux et des barreaux horizontaux sont noires comme montré sur la FIG.3A. Dans cette sous-étape, **on réalise un traitement de l'image numérisée de la grille distordue SG⁻²** pour rendre ces zones claires, et pour rendre plus sombre tout le reste de l'image. **On obtient ensuite l'image d'une grille-source notée SG⁻¹** comme montré ensuite sur la FIG.3B.

Ce traitement peut être mené à bien par une première méthode connue de l'homme du métier consistant en un filtrage linéaire au moyen de filtres linéaires correspondant à des masques de corrélation ayant la forme d'une croix.

On aurait pu, aussi, au lieu d'une mire de test en forme de grille, choisir une mire de points. L'expérience a montré que l'enregistrement par la caméra d'une mire de points est moins bon que celui d'une mire en forme de grille, à cause d'effets d'éblouissement. L'enregistrement d'une mire en forme de grille a en outre l'avantage de fournir davantage d'informations exploitables pour mener à bien le procédé selon l'invention.

On propose ci-après une méthode de traitement qui met en oeuvre un filtrage non linéaire notablement plus efficace que le filtrage linéaire connu. Les avantages de ce filtrage non linéaire par rapport à un filtre linéaire conventionnel sont qu'il :

- * ne produit pas de tache d'éblouissement,
- * est très robuste à la distorsion de l'intersection,
- * il est facile à mettre en oeuvre.

Dans l'étape d'extraction des points de référence qui est opérée sur l'image source numérisée SG⁻² de la grille, le rehaussement des intensités des intersections des barreaux de grille est essentiel. Il est donc important de réaliser un très bon filtrage.

Une intersection d'un barreau de grille horizontal avec un barreau de grille vertical est représentée schématiquement

ment sur la FIG. 4A. Les bords du barreau horizontal et du barreau vertical sont représentés par des lignes distordues puisque l'on se trouve dans l'image source distordue.

Dans cette étape, on passe un filtre en chaque point de l'image source SG⁻² de la FIG. 3A. Par ce filtrage, on détermine :

- * C le centre du filtre,
- * S, N, E, W quatre points cardinaux,
- * SE, SW, NE, NW quatre points en diagonale.

Les 8 points entourant le centre C du filtre sont entièrement définis par des distances d1 et d2.

- * d1 est la distance mesurée en pixels entre le centre C et les points cardinaux (d1 = C-S, C-N, C-E, C-W),
- * d2 est la distance mesurée en pixels entre le centre C et les points en diagonale (d2 = C-SE, C-SW, C-NE, C-NW).

La distance d1 est choisie telle que les points cardinaux retenus sont situés à l'intérieur du dessin des barreaux de grille quand le centre C est situé dans la zone d'intersection. Ce résultat est obtenu en choisissant d1 de l'ordre de 1 à 5 pixels ; d'une manière générale de l'ordre de la moitié de l'épaisseur d'un barreau de grille mesurée en pixels dans l'image distordue.

La distance d2 est choisie de telle sorte que les points diagonaux correspondants sont situés dans le fond de l'image, c'est-à-dire en dehors des régions de dessin de barreaux de grille. Cet effet est obtenu en choisissant d2 mesuré en pixels, de l'ordre de la moitié du pas de la grille distordue dans l'image numérisée. Par exemple pour une grille ayant un pas de l'ordre de 50 pixels, d2 pourra être de 20 pixels.

En choisissant des distances d1 et d2 raisonnables que l'homme du métier peut déterminer par quelques essais de routine, sans qu'aucune précision soit requise, ce filtrage permet d'obtenir que, lorsque le centre du filtre est à l'intérieur d'une zone d'intersection, alors les points cardinaux S, N, E, W sont à l'intérieur des régions des dessins des barreaux de grille, et les points en diagonale sont effectivement dans le fond, et ceci même dans les régions de l'image distordue où l'on trouve les plus fortes distorsions.

Dans le cas exemple de la grille formée de barreaux noirs sur fond blanc, avant filtrage, dans l'image SG⁻², l'intensité de chacun de ces cinq points, constitués par le centre et les quatre points cardinaux, est faible, alors que l'intensité des quatre points diagonaux est élevée.

Par le filtrage non linéaire selon l'invention, on réalise une mesure exprimée par la mesure du critère FILT suivant :

$$\text{FILT} = \text{Min}(\text{NW}, \text{NE}, \text{SE}, \text{SW}) - \text{Max}(\text{C}, \text{N}, \text{S}, \text{E}, \text{W}).$$

Dans ce critère Min(NW, NE, SW, SE) signifie que l'on évalue le minimum d'intensité relatif aux points en diagonale, et Max(C, N, S, E, W) signifie que l'on évalue le maximum d'intensité relatif aux points cardinaux incluant le centre.

Lorsque le filtre est correctement centré sur une intersection, normalement l'intensité de chacun des points en diagonale est grande donc le minimum d'intensité évalué sur les intensités de ces points est encore grand. D'autre part, normalement l'intensité de chacun des cinq points, centre et points cardinaux, est faible, donc le maximum d'intensité évalué sur les intensités de ces points est encore faible. Il en résulte que la différence entre ce Min et ce Max est grande.

Le filtre non linéaire réalise l'évaluation de ce critère FILT en chaque point de l'image distordue de la FIG. 3A. Le résultat du calcul du critère FILT constitue la sortie du filtre non linéaire selon l'invention.

Les régions d'intersection détectées sont celles où la mesure de ce critère est la plus grande. L'image obtenue résultant de ce filtrage est **une nouvelle grille source SG⁻¹** et montre, comme sur la FIG. 3B, que les régions d'intersection sont rehaussées en intensité, et que les autres régions de l'image source distordue sont assombries.

II.B2/ Seuillage appliqué aux intensités des points rehaussés (FIG.2, bloc 41 : FIG.3C)

Après la sous-étape de rehaussement de l'intensité des points des zones d'intersection, on réalise une sous-étape de seuillage sur l'intensité de ces points.

On propose ci-après une méthode de seuillage performante pour l'application à la détection des points de référence. Selon cette méthode, **un seuillage est mené à bien dans l'image rehaussée SG⁻¹** en sélectionnant un nombre référencé Nb représentant le nombre des points de plus forte intensité.

L'homme du métier qui a acquis l'image de la grille-source distordue SG⁻², telle que représentée sur la FIG. 3A, effectue :

- * le comptage du nombre N1 des intersections dans l'image,
- * le comptage, compte tenu de la numérisation, du nombre N2 approximatif de pixels contenus dans une zone d'intersection : chaque zone d'intersection a quatre côtés, et sa surface est donnée par le produit des épaisseurs

en pixels des barreaux de grille horizontaux et verticaux dans l'image distordue, comme montré par exemple sur la FIG. 4A,

- * le calcul du nombre Nb recherché égal au produit du nombre d'intersections N1 dans l'image distordue par le nombre de pixels approximatif N2 dans une zone d'intersection.

Ce nombre Nb constitue le seuil

$$Nb = N1 \times N2$$

A l'aide de ce seuil, on extrait les pixels appartenant aux zones d'intersection. Cette extraction consiste à retenir un nombre égal au nombre calculé Nb, parmi les pixels ayant les intensités les plus élevées après l'opération de filtrage, dans l'image rehaussée SG⁻¹.

A cet effet, on réalise un histogramme en comptabilisant, pour chaque niveau d'intensité, le nombre de pixels ayant cette intensité. En partant du niveau d'intensité le plus élevé, l'opération de seuillage consiste à sommer le nombre de pixels par niveau d'intensité décroissant, et à arrêter la sommation lorsque le nombre Nb seuil est atteint.

Ainsi les pixels de plus haute intensité sont retenus et leur données d'adresse et d'intensité sont mémorisées.

A l'issue de cette opération, l'image réalisée à partir de la grille test n'est plus formée que de **zones brillantes** contenant un certain nombre de pixels dont l'intensité est supérieure ou égale à l'intensité correspondant au seuil Nb sur l'histogramme, **le fond étant uniformément sombre** et dépourvu des détails de barreaux que l'on voyait encore après filtrage sur l'image SG⁻¹ de la FIG. 3B.

II.B3/ Etiquetage des points seuillés et calcul du barycentre des zones d'intersection (FIG.3C : FIG.2, bloc 41)

Les pixels extraits par seuillage à l'étape précédente sont regroupés par une méthode d'étiquetage. Les zones d'intersection contenant chacune quelques pixels seuillés regroupés sont identifiées, puis leur barycentre est calculé.

Par le calcul du barycentre, on ramène chaque zone d'intersection à un seul point, défini par un couple de coordonnées qui ne sont pas forcément entières puisqu'elles sont le résultat d'un calcul de barycentre d'une zone de plusieurs pixels.

En référence avec la FIG.3C, les barycentres ainsi extraits constituent des points ci-après appelés **points de référence** R_k, où k est le nombre qui permet de numérotiser chacun des points de référence **dans l'image source SG⁰** ainsi obtenue.

A chaque R_k, correspond une adresse dans l'image source SG⁰ maintenant obtenue, donnée par les coordonnées du barycentre calculé. Ces coordonnées sont notées rx_k selon l'axe des x et ry_k selon l'axe des y d'un **repère de coordonnées fixe Ωx, Ωy** utilisé dans cette image source SG⁰. Ce repère est orthogonal et ses axes coïncident respectivement avec une ligne et une colonne de pixels de cette image.

Sur la FIG. 3C, les barycentres ou points de référence R_k extraits sont représentés par des points noirs sur fond blanc pour la commodité du dessin, alors que dans l'exemple décrit, ils sont en réalité blanc sur fond noir.

II.C/ ESTIMATION D'UNE PREMIERE GRILLE THEORIQUE (FIG.2, BLOC 42)

Le procédé de l'invention comprend maintenant des étapes pour construire une image cible d'une grille appelée grille théorique TGⁿ qui représente la grille SG⁰ de l'image source (FIG.3C) corrigée de ses distorsions géométriques.

A l'issue de ces étapes, le procédé selon l'invention fournit des fonctions de transformation, permettant de construire de manière très précise cette grille théorique TGⁿ corrigée, à partir des données d'image de la grille source SG⁰; ces données d'image sont constituées au départ par les coordonnées rx_k, ry_k des points de référence R_k dans le repère Qx, Qy.

Selon l'invention, la grille théorique corrigée TGⁿ est construite en se fondant sur l'hypothèse que l'image source est distordue de manière radiale autour d'un centre de distorsion par rapport à l'image cible à construire.

Pour arriver à une construction précise de cette grille théorique améliorée TGⁿ telle que représentée sur la FIG. 3G, le procédé comprend d'abord une étape mise en oeuvre dans le bloc 42 de la FIG.2, comprenant elle-même des sous-étapes pour la construction **d'une première grille théorique TG⁰** :

- * une estimation d'un point appelé **centre de grille cible**, noté GC⁰, localisé à une **intersection** d'un barreau horizontal et d'un barreau vertical de cette première grille théorique. Il est repéré par ses coordonnées en pixels gcx⁰, et gcy⁰ dans un **repère orthogonal Ωx, Ωy de la première grille théorique**, dont l'axe des x est parallèle aux lignes de pixels et l'axe des y est parallèle aux colonnes de pixels, et dont l'origine correspond à l'origine Ω du repère fixe dans l'image source SG⁰,
- * une détermination de la position d'un centre optique OC⁰ considéré comme un centre de distorsion approximatif pour cette première grille théorique TG⁰.

- * une estimation d'un pas GM^0 pour cette première grille théorique, défini par les distances en pixels gmx^0 , gmy^0 entre les intersections de barreaux de cette première grille cible, selon l'axe des x et selon l'axe des y, dans le repère fixe Ωx , Ωy ,
- * une mise en correspondance de points TR_m^0 de la première grille théorique avec des points de référence R_k de la grille source distordue SG^0 . La localisation de ces points TR_m^0 situés à l'intersection des barreaux de la première grille théorique, est définie à partir des estimations du centre GC^0 et du pas GM^0 réalisés pour cette première grille théorique.

Sur les FIG. 3C et suivantes illustrant le présent exposé, on a représenté les points de référence R_k l'image source par des petits ronds, et les points d'intersection TR_m^0 de la grille théorique par des petites croix en noir sur fond blanc, quel que soit leur niveau d'intensité réel pour la simplification des dessins.

II.C1/ Estimation d'un centre GC^0 pour la première grille théorique

Cette première grille théorique est entièrement définie dès que sont déterminés un centre GC^0 et un pas GM^0 . **Les barreaux de la grille théorique sont orthogonaux et régulièrement espacés.** Il faut noter que ce centre de la grille théorique pourra se trouver à n'importe quel endroit de l'image, et même, éventuellement en dehors de l'image.

Dans cette étape, l'estimation d'un centre GC^0 pour la première grille théorique, est effectué autour du centre de distorsion de la grille source distordue, pour mener à une estimation facile du pas GM^0 de cette première grille théorique TG^0 .

En appliquant l'hypothèse des distorsions radiales, il apparaît que le centre réel de distorsion de la grille source SG^0 est situé dans une région de l'image source où les distorsions sont minimales.

L'estimation d'un centre GC^0 pour la première grille théorique comprend donc la succession d'opérations suivantes :

- * une estimation d'un point de référence de départ R_k^0 dans l'image de la grille source SG^0 , proche du centre de distorsion,
- * le report de ce point de départ R_k^0 comme centre de grille GC^0 et comme centre optique approximatif OC^0 dans l'image de la première grille théorique TG^0 . Le centre optique de la première grille théorique est différent du centre optique de la caméra 1, 2 de la FIG. 1A.

II.C1 a/ Estimation d'un point de référence R_k^0 proche du centre de distorsion dans l'image source SG^0 (FIG.2, bloc 42 : FIG.4B)

D'une manière générale toute fonction capable de fournir l'estimation d'un point de référence, noté R_k^0 , le plus rapproché du centre de distorsion de la grille source SG^0 , peut être utilisée. On présente ci-après une méthode simple et appropriée à mettre en oeuvre cette opération.

En référence avec la FIG.4B, un point de référence R_k^0 de la grille source tel que représenté sur la FIG.3C est proche du centre de distorsion réel, lorsqu'il est localisé dans une région de cette grille source SG^0 où les distorsions sont les plus faibles. Sur la FIG.4B, on a représenté un point de référence noté R_{ka}^0 et un ensemble S_{ka}^0 de points de référence voisins entourant ce point de référence R_{ka}^0 . L'ensemble des points S_{ka}^0 peut être décomposé en deux sous-ensembles de points de référence :

- * un sous-ensemble horizontal noté HS_{ka}^0 composé de points de référence situés sur le même barreau de grille horizontal dans l'image source, que le point de référence de départ R_{ka}^0 ,
- * un sous-ensemble vertical noté VS_{ka}^0 composé de points de référence situés sur le même barreau de grille vertical dans l'image source que le point de référence de départ R_{ka}^0 .

On cherche à sélectionner, parmi tous les points de référence de la grille source SG^0 celui R_k^0 qui est le plus proche du centre réel de distorsion.

Pour la détermination des points de référence R_k , l'homme du métier avait déjà, dans l'étape de filtrage I.B1/ illustrée par la FIG.4A, effectué une détermination approximative du pas de grille source, noté GM^{-1} sur la FIG.3A. Ce pas approximatif de grille source est défini pour deux distances gmx^{-1} et gmy^{-1} le long des axes de coordonnées Ωx et Ωy de l'image source SG^0 .

Selon l'invention, on propose maintenant un critère d'alignement par rapport à une bande horizontale et une bande verticale de largeurs égales aux composantes horizontale et verticale du pas approximatif GM^{-1} c'est-à-dire respectivement de largeur gmx^{-1} et gmy^{-1} , ces bandes étant centrées sur le point de référence testé R_{ka}^0 . Dans ces bandes, on sélectionne les points formant le sous-ensemble HS_{ka}^0 et le sous-ensemble VS_{ka}^0 respectivement.

De l'hypothèse radiale, il ressort que : plus le point de référence R_{ka}^0 testé est proche du centre de distorsion, plus les points des sous-ensembles VS_{ka}^0 et HS_{ka}^0 sont alignés, et plus nombreux sont les points de ces sous-ensembles dans chacune des bandes respectives de largeur gmx^{-1} et gmy^{-1} comme montré sur la FIG.4B.

En référence avec le schéma de la FIG.4B, on propose le critère d'alignement suivant :

$$AL(ka) = \sum_{S_{ka}} [(0,5 \text{ gmx}^{-1} - |rx_k - rx_{ka}|)^2 + (0,5 \text{ gmy}^{-1} - |ry_k - ry_{ka}|)^2]$$

relation dans laquelle rx_k, ry_k sont les coordonnées d'un point de référence R_k de l'un des sous-ensemble HS_{ka}^0 et VS_{ka}^0 ; et dans laquelle rx_{ka}, ry_{ka} sont les coordonnées du point de référence testé pour former le point de référence R_{ka}^0 le plus proche du centre de distorsion.

Le critère proposé $AL(ka)$ est calculé sur chaque ensemble S_{ka}^0 de points de référence de la grille source SG^0 (FIG.3C). Il apparaît que :

- * plus la mesure représentée par ce critère $AL(ka)$ est grande, et plus il existe des points appartenant à cet ensemble S_{ka}^0 . Donc, plus il existe des points de référence de la grille source SG^0 suffisamment bien alignés avec le point de référence testé, pour ne pas dépasser, avec ce point R_{ka}^0 testé, une distance géométrique égale à la moitié de la composante du pas approximatif gmx^{-1} horizontalement, et gmy^{-1} verticalement,
- * ce critère est donc une description naturellement bonne d'une région peu distordue.

Dans ce calcul du critère d'alignement $AL(ka)$, on peut affecter les points de référence de l'ensemble S_{ka}^0 de poids d'autant moins élevés que ces points sont plus éloignés du point de référence R_{ka}^0 testé.

II.C1 b/ Report du point de référence retenu R_k^0 dans la première grille théorique à construire TG^0

Les points de référence R_k de la grille source SG^0 de la FIG.3C sont testés en appliquant le critère d'alignement $AL(ka)$ proposé, et un point de référence R_k^0 pour lequel la mesure du critère est la plus grande est retenu. Ce point R_k^0 est reporté dans l'image de la première grille théorique TG^0 à construire. Il est alors référencé **centre GC^0 de la première grille théorique TG^0 et ses coordonnées gcx^0 et gcy^0 sont mémorisées** dans le repère $\Omega x, \Omega y$. On note que le centre de grille dans la grille théorique est toujours à une **intersection de barreaux**.

Un **centre optique OC^0** de la première grille théorique est aussi choisi en coïncidence avec ce centre GC^0 . Le **centre optique** de la grille théorique est ci-après défini comme **le meilleur centre des distorsions connu** dans l'étape du procédé en cours.

I.C2/ Estimation d'un pas GM^0 pour la première grille théorique

La valeur approximative GM^{-1} du pas de grille utilisée par l'homme du métier dans les phases du procédé du début jusqu'à la sous-étape précédente d'estimation d'un centre de grille GC^0 pour la première grille théorique TG^0 , doit maintenant être améliorée. A cet effet, on propose ci-après une méthode de calcul du pas de la première grille théorique effectué en deux opérations de filtrage :

- * un premier filtrage pour déterminer une valeur grossière d'un pas GM^{00} de la première grille théorique,
- * un deuxième filtrage pour déterminer une valeur plus précise d'un pas GM^0 pour la construction de la première grille théorique TG^0 .

II.C2a/ Premier filtrage pour déterminer une valeur grossière d'un pas GM^{00} pour la première grille théorique (FIG.4C)

Dans la sous-étape précédente, on a réalisé l'estimation d'un centre de grille GC^0 pour la construction de la première grille théorique, comme le point de référence R_k^0 le plus proche du centre de distorsion dans l'image source SG^0 .

En référence avec la FIG.4B, à ce point de référence R_k^0 était associé un ensemble de points de référence S_k^0 , décomposable en deux sous-ensembles de points de référence :

- * un sous-ensemble horizontal noté HS_k^0 composé des points de référence situés sur le même barreau horizontal que le point de référence R_k^0 dans l'image source SG^0 , délimité par une bande horizontale de hauteur gmy^{-1} qui est la composante verticale du pas de grille approximatif GM^{-1} ;
- * un sous-ensemble vertical noté VS_k^0 composé des points de référence situés sur le même barreau vertical que le point de référence R_k^0 dans l'image source SG^0 , délimité par une bande verticale de largeur gmx^{-1} qui est la

composante horizontale du pas de grille approximatif GM^{-1} .

En référence avec la FIG.4C, on réalise le premier calcul grossier des deux composantes gmx^{00} et gmy^{00} d'un pas pour la première grille théorique :

- * en calculant la composante gmx^{00} selon l'axe des Ωx du repère fixe comme le résultat du filtrage par un filtre médian appliqué sur les distances HD_k^0 entre les points de référence du sous-ensemble horizontal HS_k^0 ,
- * en calculant la composante gmy^{00} selon l'axe Ωy du repère fixe comme le résultat du filtrage par un filtre médian appliqué sur les distances entre les points de référence du sous-ensemble vertical VS_k^0 .

A cet effet, on ordonne les points de référence dans le sous-ensemble horizontal HS_k^0 . On fait de même dans le sous-ensemble VS_k^0 non représenté ; puis on calcule les valeurs des distances entre ces points de référence, et on ordonne ces valeurs de la plus petite à la plus grande. Ensuite, on applique un filtre médian sur les valeurs ordonnées dans les ensembles HS_k^0 et VS_k^0 , horizontalement et verticalement. Le filtre médian retient la valeur située au milieu des valeurs ordonnées horizontalement pour gmx^{00} ; et de même verticalement pour gmy^{00} .

Les filtres médians ont pour avantage de fournir des résultats robustes aux erreurs de localisation des points traités. En particulier le résultat reste correct, dans la bande horizontale ou verticale de points traités, même lorsqu'un point est manquant parce qu'il n'a pas été extrait, ou bien lorsqu'un point extrait existe par erreur. Les filtres médians donnent des résultats meilleurs que les calculs simples de moyennes.

Les mesures effectuées dans cette première phase de filtrage constituent un couple robuste gmx^{00} , gmy^{00} pour une valeur grossière du pas dans la construction de la première grille théorique. Cette valeur grossière n'a cependant pas la précision suffisante pour construire la première grille théorique. C'est pourquoi, on procède ensuite à un second filtrage pour fournir une valeur du pas de grille suffisamment précise pour débiter cette construction.

II.C2 b/ Deuxième filtrage pour déterminer une valeur plus précise d'un pas GM^0 pour la construction de la première grille théorique (FIG.2, bloc 42 : FIG.4D)

En référence avec la FIG.4D, on sélectionne un sous-ensemble S_k^0 de 8 points de référence situés autour du point de référence R_k^0 retenu comme le plus proche du centre de distorsion dans l'image source SG^0 . La recherche de chacun de ces voisins est faite en utilisant la valeur du pas approximatif GM^{00} déterminée dans le premier calcul. Chacun de ces 8 voisins est identifié comme le point de référence correspondant le mieux à ce premier calcul.

De nouveau, on applique un filtre médian qui opère maintenant sur les valeurs des distances entre les points de référence ainsi définis. On utilise dans ce deuxième filtrage 6 intervalles horizontaux HS_k^0 et 6 intervalles verticaux VS_k^0 ; on ordonne ces intervalles par valeurs croissantes et on détermine par filtrage médian les nouvelles valeurs des composantes horizontale gmx^0 et verticale gmy^0 du pas de grille, notée GM^0 , situées au milieu de ces valeurs ordonnées en horizontal et en vertical respectivement, qui sont plus précises que les valeurs déterminées par le filtrage de l'étape précédente, du fait que le filtrage est uniquement réalisé dans une région de l'image source proche du centre de distorsion, et donc présentant les plus faibles distorsions.

On note que, dans chacun de ces deux filtrages, des points de référence utilisés pour passer les filtres médians peuvent être erronés ou manquants. Mais du fait que ces premier et second filtrages sont basés sur la sélection des valeurs médianes des intervalles considérés, les résultats ne sont pas notablement affectés.

Il en résulte que l'on dispose à la fin de cette sous-étape en deux opérations :

- * d'une mesure robuste,
- * et d'une mesure suffisamment précise d'un pas $GM^0 = (gmx^0, gmy^0)$, pour la construction de la première grille théorique. **Ces données sont mémorisées.**

Dans la méthode selon l'invention, la robustesse des données d'image de départ pour construire la première grille théorique, à savoir :

- * le centre de grille GC^0 déterminé par les coordonnées d'un point de référence R_k^0 proche du centre de distorsion,
- * le centre optique OC^0 également déterminé par R_k^0
- * le pas de grille GM^0 ,

sont très importantes, car l'invention vise à fournir une méthode **automatique** de détermination des fonctions de correction.

II.C3/ Estimation de premiers couples P_k^0 formés de points de référence R_k de la grille source SG^0 et de points TR_m^0 de la première grille théorique TG^0 (FIG.2, bloc 42)

Ayant maintenant la connaissance,

- * des coordonnées g_{cx}^0, g_{cy}^0 du centre de grille GC^0 ,
- * des composantes g_{mx}^0, g_{my}^0 du pas de grille GM^0 dans le repère fixe $\Omega x, \Omega y$, on construit la première grille théorique en plaçant, dans ce repère fixe, les intersections de ses barreaux notés TR_m^0 , où m est un indice qui permet de numérotter chaque point d'intersection dans la grille théorique..

Dans cette étape, on travaille sur l'image source SG^0 des points de référence telle que représentés sur la FIG. 3C, et sur la première grille théorique TG^0 comme définie plus haut. En partant de ces deux images SG^0 et TG^0 , on détermine pour la première fois des couples notés P_k^0 , de points correspondants formés d'un point de référence P_k et d'un point de grille théorique TR_m^0 .

On écrit cette correspondance sous la forme :

$$P_k^0 = [R_{f(k)}, TR_{g(k)}^0]$$

où f et g sont des fonctions de correspondance entre les points de référence R_k de grille source et les points d'intersection recherchés TR_m^0 de la grille théorique. En effet, rien n'indique que le point TR_m^0 trouvé dans la grille théorique TG^0 pour correspondre à R_k dans la grille source SG^0 aura le même numéro, et donc le même indice que le point de référence R_k .

Par exemple R_k dans SG^0 pourrait avoir le numéro 100 ($k = 100$) alors que TR_m^0 dans TG^0 pourrait avoir le numéro 200 ($m = 200$). Dans ce cas, on écrirait que $f(k) = g(k)$, c'est-à-dire que $f(100) = g(200)$ lorsque les points R_k et TR_m^0 sont appariés, et on déterminerait ainsi une relation de mise en correspondance des points du couple P_k^0 . Ce pourrait être par exemple $f(100) = g(200) = 120$.

Dans la région de faible distorsion proche du centre de grille GC^0 , l'opération de première mise en correspondance consiste à sélectionner les couples P_k^0 formés chacun d'un point de référence $R_{f(k)}$ et d'un point $TR_{g(k)}^0$ de la première grille théorique, le plus proche l'un de l'autre par un critère de proximité simple.

Au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre, cette façon d'opérer ne peut plus être utilisée, car les points des couples deviennent de plus en plus éloignés l'un de l'autre, et vers les bords des images source SG^0 et cible TG^0 considérées, on se trouve dans la situation où le point de grille théorique doit être mis en correspondance avec un point de référence sélectionné parmi plusieurs points de référence qui semblent tous a priori de bons candidats.

Dans le but de résoudre ce problème, on part donc du centre de grille GC^0 , et on forme le premier couple dans cette première grille théorique constitué du centre de grille GC^0 situé à une intersection de barreaux, et avec le point de référence R_k^0 qui coïncide avec GC^0 , puis on construit des seconds couples P_k^0 autour de ce centre de grille GC^0 . Ensuite, en s'appuyant sur les connaissances acquises de ces premier et second couples P_k^0 , on construit de nouveaux couples de proche en proche, en progressant pas à pas du centre de grille GC^0 vers les bords par une méthode décrite ci-après.

Selon cette méthode, pour construire pour la première fois des couples P_k^0 en progressant pas à pas du centre GC^0 vers les bords des images, à chaque pas, on définit une couronne rectangulaire de taille croissante autour du centre GC^0 .

Ainsi, dans à la fois la grille source SG^0 et la première grille théorique TG^0 , avec le point de référence R_k^0 et le centre de grille GC^0 en coïncidence :

- * la première couronne se compose du centre de grille GC^0 lui-même,
- * la seconde couronne rectangulaire se compose de ses 8 voisins directs de GC^0 ,
- * la troisième couronne rectangulaire se compose de ses 16 seconds voisins de GC^0 .

Sur la FIG.4E, les points $TR_{g(k)}^0$ de la grille théorique sont représentés par des croix quand ils sont suffisamment éloignés des points de référence $R_{f(k)}$, eux-mêmes représentés par des ronds, pour en être distingués.

Plus la couronne traitée est éloignée du centre de grille GC^0 , et plus les couples P_k^0 sont formés de points distincts et distants.

En référence avec la FIG.6A, dans une couronne rectangulaire courante α , après la mise en correspondance d'un point de référence $R_{f(k\alpha)}$ et d'un point $TR_{g(k\alpha)}^0$ de grille théorique, on trace un rayon passant par le centre de grille GC^0 et par le point de grille $TR_{g(k\alpha)}^0$ testé dans cette couronne courante α . Et on mesure le vecteur d'erreur :

$$V_{k\alpha}^0 = TR_{g(k\alpha)}^0 - R_{f(k\alpha)}$$

Ce vecteur $V_{k\alpha}^0$ constitue l'erreur de mise en correspondance des points du couple $P_{k\alpha}^0$ dans cette couronne α , erreur due à la distorsion.

En référence avec la FIG.6B, dans une couronne β suivante plus éloignée du centre de grille GC^0 , un point de référence est recherché dans l'image source SG^0 pour correspondre à un nouveau point testé $TR_{g(k\beta)}^0$ de la première grille théorique TG^0 . A cet effet, on a mémorisé les vecteurs d'erreur $V_{k\alpha}^0$ relatifs à tous les couples $P_{k\alpha}^0$ de la couronne précédente α . On trace le rayon passant par le centre GC^0 et par le point testé $TR_{g(k\beta)}^0$. On recherche dans la couronne précédente α le point de grille théorique $OTR_{g(k\alpha)}^0$ le plus près de ce rayon (GC^0 , $TR_{g(k\alpha)}^0$) que l'on vient de tracer. Ce point de grille $TR_{g(k\alpha)}^0$ correspondait à un point de référence $R_{f(k\alpha)}$ par le vecteur d'erreur $9V_{gk\alpha}^0$ défini plus haut. Ce vecteur d'erreur $V_{k\alpha}^0$ est alors appliqué au nouveau point testé $TR_{g(k\beta)}^0$ pour estimer le point de référence correspondant. Le point de référence $R_{f(k\beta)}$ le plus proche de cette estimation est retenu s'il est trouvé dans une fourchette de distance acceptable défini par les composantes du pas de grille théorique gm_x^0 , gm_y^0 . Un nouveau couple $P_{k\beta}^0$ est alors formé dans la mesure où un point de référence $R_{f(k\beta)}$ existe.

Un nouveau vecteur d'erreur $V_{k\beta}^0$ est alors mémorisé pour servir d'entrée au traitement des points de la couronne suivante.

Ainsi, on a défini un critère de proximité particulier selon lequel à partir du vecteur d'erreur entre les points d'un couple dans une couronne, on forme les couples dans la couronne suivante plus éloignée du centre, et, on mesure le nouveau vecteur d'erreur qui a grandi dans cette couronne suivante. Et à partir du vecteur d'erreur mesuré dans la couronne précédente, ainsi de proche en proche, la procédure est répétée jusqu'à ce que la taille des couronnes soit égale à la taille de l'image.

II-D/ CONSTRUCTION D'UNE GRILLE THEORIQUE PAR UN PROCEDE D'ITERATION FONDE SUR L'HYPOTHESE DES DISTORSIONS RADIALES (FIG.2, blocs 43 à 46)

La méthode selon l'invention consiste, à partir des caractéristiques de la première grille théorique TG^0 , à construire maintenant la meilleure grille théorique possible, c'est-à-dire à construire une grille théorique TG^n aussi bien corrigée en distorsion que possible.

Pour résoudre ce problème la méthode selon l'invention est itérative. A chaque itération, cette méthode comprendra les étapes de :

- * calcul d'un polynôme F^n de correction radiale, mis en oeuvre dans le bloc 44),
- * calcul de l'erreur E^n de modélisation et mémorisation de l'optimum, mis en oeuvre dans le bloc 45,
- * modification du centre optique OC^n mise en oeuvre dans le bloc 46,
- * estimation d'une nouvelle grille théorique TG^n , mis en oeuvre dans le bloc 43.

Dans les étapes précédentes, on avait affecté d'un indice zéro (0), placé en exposant, toutes les notations relatives aux premières estimations du centre GC^0 , du pas GM^0 et des couples P_k^0 de points de la première grille théorique TG^0 à construire. Chaque itération sera repérée par un indice placé en exposant, cet indice croissant à partir de zéro à chaque nouvelle itération. Par exemple, à l'itération n , le centre de grille est GC^n , le centre optique est OC^n , le pas de grille est GM^n , les couples sont P_k^n etc.

En référence avec la FIG.2, cette méthode itérative forme une boucle.

En supposant connus les éléments de construction d'une première grille théorique telle que TG^0 , définie par son centre de grille GC^0 , son pas GM^0 , son centre optique OC^0 ,

- * on calcule d'abord, dans le bloc 44, un polynôme F^0 de correction des distorsions radiales,
- * on calcule ensuite dans le bloc 45, une erreur E^0 de modélisation,
- * on modifie alors, dans le bloc 46 fermant la boucle, la position du centre optique approximatif qui était OC^0 dans la première grille théorique et que l'on déplace en OC^1 pour chercher à le rapprocher d'une position idéale où l'hypothèse radiale est vérifiée, c'est-à-dire où les points de grille théorique sont alignés avec les points de référence et avec le centre optique, comme montré sur la FIG.3D,
- * ayant modifié le centre optique maintenant noté OC^1 , on réestime dans le bloc 43 les éléments de construction d'une seconde grille théorique TG^1 définie par son centre de grille GC^1 , son pas de grille GM^1 ; on construit cette seconde grille théorique TG^1 au moyen de ces nouveaux éléments GC^1 et GM^1 , puis toujours dans ce bloc 43, on réalise la mise en correspondance des nouveaux points de grille théorique $TR_{g(k)}^1$ et des points de référence de

l'image source SG^0 ,

- * à ce moment là, on poursuit le procédé d'itération dans le bloc 44 par le calcul du polynôme F^1 de correction des distorsions radiales, puis dans le bloc 45 par le calcul de l'erreur E^1 de modélisation et on reboucle l'itération dans le bloc 46 par la modification du centre optique qui devient OC^2 , etc.

On va se placer maintenant dans l'itération n , en sortie du bloc 46 de la boucle, où l'on vient de modifier la position du centre optique, qui devient OC^n .

On porte alors cette connaissance du nouveau centre optique OC^n dans le bloc 43 de la chaîne d'itération où l'on dispose encore seulement des caractéristiques de la grille théorique TG^{n-1} à l'itération $n-1$, et où l'on va calculer des nouvelles caractéristiques de grille théorique, un nouveau centre de grille GC^n et un nouveau pas de grille GM^n pour construire la nouvelle grille théorique à l'itération n .

Dans ce même bloc 43, on effectuera ensuite la mise en correspondance des nouveaux points $TR_{g(k)}^n$ de grille théorique et des points de référence $R_{f(k)}$ pour former des nouveaux couples P_k^n .

II.D1/ Estimation précise du centre de grille GC^n , et du pas de grille GM^n (FIG.2, bloc 43)

En référence avec la FIG.2, dans le bloc 43, à l'itération n , on part de la connaissance du centre optique OC^n , nouvellement mis-à-jour dans le bloc 46 de la boucle d'itération.

On part également des couples de points P_k^{n-1} , qui sont notées :

$$P_k^{n-1} = R_{f(k)}, TG_{g(k)}^{n-1}$$

où les indices en exposant indiquant le numéro de l'itération $n-1$ où ces valeurs ont été déterminées.

On part aussi de la connaissance à la dernière itération $n-1$:

- * du centre de grille $GC^{n-1} = (gcx^{n-1}, gcy^{n-1})$,
- * du pas de grille théorique $GM^{n-1} = (gmx^{n-1}, gmy^{n-1})$

On cherche à déterminer maintenant à l'itération n :

- * un centre de grille amélioré $GC^n = (gcn, gcy^n)$
- * et un pas de grille amélioré $GM^n = (gmx^n, gmy^n)$,

Ces paramètres définissent une nouvelle mise-à-jour des points de grille $TR_{g(k)}^n$. Toutes les caractéristiques de grille mises à jour sont calculées en pixels dans le repère de coordonnées fixe $\Omega x, \Omega y$.

A cet effet, on utilise l'hypothèse de base appelée **hypothèse radiale** selon laquelle, si le centre optique OC^n est correct, alors les distorsions qui sont radiales par nature, ont pour effet de déplacer les points de la grille de la mire réelle M , le long de rayons passant par le centre OC^n et par les points de référence $R_{f(k)}$ comme montré sur la FIG.3D.

Cela indique que les points $TR_{g(k)}^n$ de la grille théorique devraient se trouver près de ces rayons. C'est-à-dire que la grille théorique la meilleure doit être calculée de manière à minimiser la distance géométrique entre les points de la grille théorique $TR_{g(k)}^{n-1}$ à l'itération $n-1$ et un rayon passant par le centre optique OC^0 estimé dans cette boucle d'itération n et lesdits points de référence $R_{f(k)}$.

En référence avec la FIG.7A, on a représenté le centre optique OC^n venant du bloc 46, le point de grille $TR_{g(k)}^{n-1}$ mémorisé à l'itération précédente $n-1$, le point de référence correspondant $R_{f(k)}$ formant à l'itération précédente $n-1$ un couple P_k^{n-1} avec ledit point de grille $TR_{g(k)}^{n-1}$. On a tracé le rayon $OC^n - R_{f(k)}$, et la distance géométrique Δ_k^{n-1} entre le point de grille $TR_{g(k)}^{n-1}$ et le rayon $OC^n - R_{f(k)}$.

Dans cette étape, à l'itération n , on cherche à minimiser cette distance géométrique Δ_k^{n-1} , pour améliorer l'alignement du centre optique OC^n et des points des couples formés des points de grille et des points de référence correspondants.

Plus précisément, on définit une distance

$$\Delta_k^n = [TR_{g(k)}^{n-1}, (OC^n, R_{f(k)})]$$

qui est la distance géométrique mémorisée à l'itération $n-1$, entre un point $TR_{g(k)}^{n-1}$ de la grille théorique TG^{n-1} et le rayon passant par le centre OC^n et le point de référence correspondant $R_{f(k)}$.

On peut écrire que, dans le repère $\Omega x, \Omega y$ fixe :

$$TR_{g(k)}^{n-1} = [(gcx^{n-1} + gmx^{n-1} \times \lambda_{x(k)}), (gcy^{n-1} + gmy^{n-1} \times \mu_{y(k)})]$$

Dans cette formule les points de grille $TR_{g(k)}^{n-1}$ ne dépendent que des composantes gmx^{n-1} , gmy^{n-1} du pas de grille théorique et des composantes gcx^{n-1} , gcy^{n-1} du centre de grille théorique.

Dans cette formule également, les paramètres $\lambda_{x(k)}$ et $\mu_{y(k)}$ définissent respectivement le nombre de pas de grille théorique respectivement gmx^{n-1} et gmy^{n-1} dont il faut se déplacer parallèlement aux axes Ωx , Ωy , pour trouver le point de grille $TR_{g(k)}^{n-1}$ à partir du centre de grille théorique de coordonnées gcx^{n-1} , gcy^{n-1} .

Par exemple, pour réaliser la FIG.7A, on a supposé que le point de grille était à $\lambda_{x(k)} = 4$ pas de grille en horizontal et à $\mu_{y(k)} = 2$ pas de grille en vertical à partir de grille GC^{n-1} , lui-même repéré par ses composantes gcx^{n-1} , gcy^{n-1} en pixels dans le repère fixe Ωx , Ωy .

Ensuite, le centre GC^n et le pas de grille GM^n sont calculés à cette itération n dans le bloc 43 en effectuant la minimisation d'un critère noté Φ^n , appelé ci-après critère radial, qui exprime l'hypothèse radiale énoncée plus haut, selon laquelle la meilleure grille théorique possible correspond à des distances Δ_k^n plus petites à l'itération n qu'à itération $n-1$.

Ce critère radial s'écrit :

$$\Phi^n(gcx^n, gcy^n, gmx^n, gmy^n) = \sum_k (\Delta_k^n)^2$$

Pour que ce critère Φ^n ait une solution non ambiguë, il convient d'exclure la solution où le pas de grille est nul et où le centre de grille est confondu avec le centre optique, car dans tous ces cas le critère Φ^n est nul, et aucune solution constructive ne peut être trouvée. Par contre, si le pas de grille est contraint d'avoir une grandeur raisonnable, et si le centre de grille est différent du centre optique, alors le problème est bien posé.

Toute méthode de minimisation, menant à une solution non singulière, est bonne et peut être utilisée. On propose selon l'invention une méthode incluant les étapes suivantes :

- * départ avec une valeur raisonnable du pas de grille GM^{n-1} , en posant dans le critère radial Φ^n , les composantes gmx^{n-1} et gmy^{n-1} du pas de grille fixes,
- * minimisation du critère radial Φ^n , par rapport au centre de grille GC^{n-1} : les composantes gmx^{n-1} , gmy^{n-1} du pas étant fixes, on dérive la formule du critère radial Φ^n par rapport aux deux coordonnées variables gcx^{n-1} , gcy^{n-1} du centre de grille GC^{n-1} . Ce calcul de dérivées fournit deux formules explicites qui donnent des valeurs de coordonnées gcx^n et gcy^n pour mettre à jour le centre de grille GC^n à cette itération n ,
- * minimisation du critère radial Φ^n , par rapport au pas de grille GM^{n-1} : on fixe maintenant les coordonnées gcx^n et gcy^n du centre de grille qui viennent d'être calculées, et on dérive la formule du critère radial Φ^n par rapport aux composantes du pas de grille variables gmx^{n-1} , gmy^{n-1} . Ce calcul de dérivées fournit à nouveau deux formules explicites qui donnent des valeurs de composantes gmx^n et gmy^n pour mettre à jour le pas de grille GM^n à cette itération n ,
- * répétition de ces opération autant de fois que nécessaire jusqu'à l'obtention d'une précision requise.

II-D2/ Estimation à l'itération n des couples des points de référence-points de grille théorique correspondants (FIG.2, bloc 43)

Cette opération est faite en pratiquant exactement la même procédure que pour la première grille théorique à l'exception que l'on utilise les valeurs du centre et du pas GC^n et GM^n , respectivement mises à jour à l'itération n lors de l'étape précédente.

A l'itération n , dans le bloc 43 de la FIG.2, on dispose maintenant dans le repère fixe Ωx , Ωy , de :

- * une mise à jour des coordonnées du centre de grille $GC^n = (gcx^n, gcy^n)$
- * une mise à jour des composantes du pas de grille $GM^n = (gmx^n, gmy^n)$
- * la position du centre optique OC^n provenant du bloc 46.

Ces caractéristiques permettent de construire une nouvelle grille théorique TG^n mise à jour, à mailles rectangulaires régulièrement espacées, comme sur la FIG.3E.

On réalise alors la procédure de mise en correspondance des points de référence $R_{f(k)}$ de la grille source SG^0 et des points $TG_{g(k)}^n$ de la nouvelle grille théorique TG^n pour former des nouveaux couples P_k^n . En effet, du fait du changement du centre et du pas de la nouvelle grille théorique, le point de référence qui avait été trouvé à l'itération $n-1$ pour former un couple avec un point de grille donné peut maintenant ne plus être le meilleur candidat. Une nouvelle mise en correspondance doit donc être effectuée.

On réalise alors cette procédure de nouvelle mise en correspondance des points de grille de la grille théorique TG^n et des points de référence de l'image source en considérant des couronnes rectangulaires croissant autour du centre de grille GC^n localisé par ses nouvelles coordonnées (gcx^n, gcy^n) , et en formant les couples P_k^n par progression pas-à-pas, couronne après couronne, en appliquant le critère de proximité proposé dans l'exposé de la construction de la première grille théorique TG^0 .

II-E/ CALCUL D'UN POLYNOME DE CORRECTION RADIALE (FIG.2, bloc 44)

En partant des couples P_k^n déterminés à l'étape précédente de la chaîne qui constitue l'itération n, on calcule des couples de rayons :

- * un premier rayon X_k^n ayant pour valeur la longueur du segment qui lie le centre optique OC^n et point de grille $TG_{g(k)}^n$ d'un de ces couples P_k^n ;
- * un second rayon Y_k^n ayant pour valeur la longueur du segment qui lie le centre optique OC^n et le point de référence $R_{f(k)}^n$ de ce couple P_k^n .

En référence avec la FIG.7B, ces rayons s'expriment par :

$$X_k^n = (OC^n, TR_{g(k)}^n)$$

$$Y_k^n = (OC^n, R_{f(k)}^n)$$

où $(TR_{g(k)}^n, R_{f(k)}^n) = P_k^n$

Ces couples de rayons sont calculés pour chaque couple P_k^n de la grille théorique TG^n nouvellement mise à jour.

On calcule ensuite une fonction polynomiale F^n qui relie au mieux les rayons Y_k^n aux rayons X_k^n de chaque couple

P_k^n .

En référence avec la FIG.8A, on a représenté sur un graphe des rayons X_{k1}^n, X_{k2}^n , en abscisse X, et des rayons Y_{k1}^n, Y_{k2}^n en ordonnées Y, formant des couples P_{k1}^n, P_{k2}^n respectivement, le centre optique OC^n étant placé à l'origine des axes de coordonnées graduées en pixels. Ces couples P_{k1}^n, P_{k2}^n forment, sur ce graphe, des points symbolisés par des petits ronds, qui se répartissent de part et d'autre de la courbe représentative de la fonction polynomiale F^n recherchée. Sur la FIG.8A on s'est limité à la représentation de deux couples de rayons pour la clarté du dessin.

En référence avec la FIG.8B, on a représenté sur un graphe dont les axes de coordonnées X et Y sont gradués en nombre de pixels, six couples $OP_{k1}^0, P_{k2}^0, P_{k3}^0, P_{k4}^0, P_{k5}^0, P_{k6}^0$ formés en relation avec la première grille théorique SG^0 . Sur ce graphe, le centre optique OC^0 est porté à l'origine des axes de coordonnées, les rayons X_k^0, Y_k^0 sont portés sur l'axe des abscisses et des ordonnées respectivement. A cette itération numéro zéro, les points représentant les couples P_k^0 forment un nuage de points autour de la courbe représentative de la fonction F^0 trouvée pour relier les rayons X_k^0, Y_k^0 .

En référence avec la FIG.8C, on a représenté sur un graphe dont les axes de coordonnées X et Y sont gradués en nombre de pixels six autres couples $P_{k1}^m, P_{k2}^m, P_{k3}^m, P_{k4}^m, P_{k5}^m, P_{k6}^m$ formés en relation avec une grille théorique SG^m , à une itération numérotée m où la correction des distorsions est devenue pratiquement parfaite. Dans ce cas l'ensemble des couples P_k^m constitue une courbe lissée correspondant à la fonction polynomiale F^m .

En référence avec ces FIG.8A à 8C, on a trouvé que la fonction F^n la mieux appropriée à relier les couples de rayons X_k^n, Y_k^n à l'itération n, était un polynôme de degré 5 ou 6 ; un polynôme de degré 3 par exemple ne suffit pas à résoudre ce problème. Il est apparu que la correction des distorsions radiales nécessitait le calcul d'un polynôme d'ordre supérieur à 3.

En référence avec la FIG.8A, à l'itération n, on peut mesurer pour chaque rayon $X_{k1}^n, X_{k2}^n \dots$ l'erreur respectivement $E_{k1}^n, E_{k2}^n \dots$ qui existe entre les rayons $Y_{k1}^n, Y_{k2}^n \dots$ et la fonction polynomiale F^n qui relie au mieux les points de couples $P_{k1}^n, P_{k2}^n \dots$. Sur l'ensemble des couples P_k^n de la grille théorique TG^n , à l'itération n, cette erreur appelée ci-après erreur de modélisation E^n s'écrit :

$$E^n = \sum_k \{ [Y_k^n - F^n(X_k^n)]^2 \}$$

Il est important de noter que le polynôme F^n , ci-après appelé **polynôme de correction radiale**, constitue à l'itération n, **une formule de transformation qui permet de passer :**

- * d'un point $TR_{g(k)}^n$ de la grille théorique corrigée,
- * à un point de référence $R_{f(k)}^n$ de la grille source distordue.

Ce polynôme F^n peut être décomposé en deux composantes rectangulaires F_x^n et F_y^n .

II-F/ CALCUL DE L'ERREUR DE MODELISATION (FIG.2, bloc 45)

En référence avec la FIG.2, dans la chaîne qui constitue l'itération n, à l'étape symbolisée par le bloc 45, on calcule le meilleur polynôme de correction radiale F^n pour minimiser l'erreur de modélisation E^n , par une opération de régression linéaire classique.

Une erreur de modélisation E^n est calculée à chacune des itérations de 0 à, par exemple, 10. Et ces erreurs de modélisation E^0, E^1, \dots, E^{10} sont mémorisées. Parmi les différentes erreurs de modélisation calculées au cours des 10 cycles d'itération pris comme exemple, l'une d'elle, à une itération numérotée N_{opt} , se révèle inférieure aux autres erreurs calculées aux itérations antérieures et éventuellement aux itérations ultérieures.

Cette erreur minimale $E^{N_{opt}}$ est mémorisée en même temps que le polynôme de correction radiale $F^{N_{opt}}$, ou bien ses composantes rectangulaires $F_x^{N_{opt}}, F_y^{N_{opt}}$.

I-G/ MODIFICATION DU CENTRE OPTIQUE DE LA GRILLE THEORIQUE (FIG.2, bloc 46)

L'erreur de modélisation E^n calculée précédemment à l'itération n , dans la méthode selon l'invention basée sur l'hypothèse radiale, dépend fortement de la position OC^n trouvée pour le centre optique, qui devient idéal lorsqu'il est au centre des distorsions.

Dans la chaîne d'itération représentée sur la FIG.2, on trouve une boucle concrétisée par le bloc 46, qui reçoit en entrée les données du bloc 45 de calcul d'énergie d'erreur et qui fournit en sortie, au bloc 43, un centre optique modifié OC^{n+1} pour calculer une nouvelle grille théorique TG^{n+1} dans une nouvelle itération $n+1$.

On rappelle que selon l'invention, la minimisation de l'énergie d'erreur E^n forme la solution du problème de correction des distorsions fondé sur l'hypothèse radiale.

A cet effet, à chaque itération, de 0 à 10 par exemple, la position du centre optique OC^n , repéré dans la grille théorique TG^n , par ses coordonnées dans le repère fixe $\Omega x, \Omega y$

$$OC^n = (ocx^n, ocy^n)$$

est modifiée pour coopérer à minimiser l'erreur de modélisation E^n . La meilleure position du centre optique OC^n pour obtenir cette minimisation peut être recherchée de plusieurs manières.

Dans une première méthode, une zone de recherche large est définie autour du centre optique de départ que l'on avait noté OC^0 à l'itération zéro. Au cours de chaque itération, on teste un des points de cette zone de recherche large, pour constituer un centre optique. On réalise autant d'itérations que de points à tester dans la zone de recherche large (FULL SEARCH). On retient finalement comme centre optique celui qui correspond à l'erreur de modélisation la plus faible.

Une seconde méthode, moins coûteuse en temps de calcul, est fondée sur le calcul de gradients. A deux itérations successives, une première localisation, puis une seconde localisation sont essayées, dans une direction donnée à partir du premier centre optique OC^0 . Selon que ces premiers essais conduisent à une diminution ou à une augmentation de l'erreur de modélisation E^n , la meilleure position du centre optique continue à être recherchée dans la même direction et le même sens, ou bien dans la même direction et en sens opposé. Puis d'autres directions sont essayées, faisant un angle donné avec la première direction et finalement on retient l'itération où, dans une direction et un sens donné, on a trouvé le meilleur centre optique pour minimiser l'erreur de modélisation.

On mémorise le numéro N_{last} de l'itération à laquelle on a trouvé la position de ce centre optique la meilleure pour minimiser l'erreur de modélisation.

II-H/ SORTIE DE LA CHAÎNE D'ITERATION

Dans ces conditions les meilleures conditions de mise à jour en sortie du bloc 45 représenté sur la FIG.2 correspondent à une itération où l'on fait coopérer les conditions trouvées à N_{opt} et les conditions trouvées à N_{last} . Cette itération devient la dernière itération : elle est numérotée N_{opt} (N_{last}).

La meilleure fonction polynomiale correspondante, pour minimiser l'erreur de modélisation, est alors notée :

$$G = F^{N_{opt}(N_{last})}$$

et ses composantes rectangulaires sont deux polynômes notés :

$$G_x = F_x^{N_{opt}(N_{last})}(x, xy)$$

$$G_y = F_y^{N_{opt}(N_{last})}(y, xy)$$

Ces composantes sont des polynômes à deux coordonnées car chacun doit être appliqué à un point couple P_k^n en coordonnées cartésiennes.

En référence avec la FIG.7C et avec la FIG.3D, il apparaît qu'après les opérations d'itérations qui ont mené à la détermination des conditions correspondant à la dernière itération N_{opt} (N_{last}) le centre optique a maintenant une

position :
 OC^{Nlast}

et les points de grille $TR_{g(k)}^{Nlast}$ et de référence $R_{f(k)}$ formant les couples P_k^{Nlast} sont alignés au mieux sur un même rayon.

En référence avec la FIG.8D, les points de couples P_k^{Nlast} sont sur la courbe lissée représentant la fonction polynomiale $F^{Nlast(Nopt)}$.

Une grille théorique idéale correspondant à ces conditions est montrée sur les FIG.3F et 3G, TG^{n1} et TG^{n2} .

Une fois que la fonction polynomiale G , ou bien les composantes G_x et G_y ont été calculées, TOUTES LES ETAPES PRECEDENTES SONT TERMINEES DEFINITIVEMENT.

La connaissance des fonctions G , ou G_x , G_y est suffisante pour assurer la correction des distorsions optiques de toute image enregistrée par la caméra 2 et son système de prise de vue 1 (FIG.1).

III. CORRECTION DES DISTORSIONS OPTIQUES DANS UNE IMAGE (FIG.1, sous-ensemble 47 : et FIG.2, sous-ensemble 47)

Comme on l'a dit précédemment, les composantes G_x et G_y sont des formules de transformation qui font passer de l'espace rectifié noté image cible TI, vers l'espace distordu noté image source SI d'origine.

Dans l'image cible à construire TI, les coordonnées de chaque pixel x_{TI} et y_{TI} dans le repère fixe Ωx , Ωy , sont mémorisées. L'image TI est alors balayée pixel par pixel, par exemple par balayage vidéo usuel.

La valeur de l'intensité ou niveau de lumière monochromatique, ou niveau de gris qui doit être attribué au pixel courant X_{TI} , Y_{TI} de l'image cible, est cherchée à une adresse de l'image source X_{SI} , Y_{SI} calculée à l'aide des polynômes de transformation G_x , G_y stockés dans le bloc 47 :

$$X_{SI} = G_x(x_{TI}, y_{TI})$$

$$Y_{SI} = G_y(x_{TI}, y_{TI})$$

Le point trouvé à l'adresse x_{SI} , y_{SI} dans l'image source SI n'étant en général pas un pixel, le niveau de lumière monochromatique ou niveau de gris est calculé pour ce point par interpolation à partir de l'intensité de ses voisins pixels dans cette image source. Puis la valeur d'intensité calculée par interpolation est attribuée au pixel courant à l'adresse x_{TI} , y_{TI} dans l'image cible et est mémorisée dans la seconde mémoire d'image.

Revendications

1. Dispositif de formation d'image comprenant :

un système de prise de vue (1),
 un système de saisie (2) des données d'une image source (SI) distordue par le système de prise de vues,
 un système de numérisation (3) de ladite image source (SI) incluant une première mémoire d'image pour le stockage des données d'intensité de chaque pixel repéré par une adresse dans une matrice bidimensionnelle,
 un système de traitement d'image numérique (4,47) de construction d'une image cible (TI) corrigée en distorsions, correspondant à l'image source (SI),

dans lequel, le système de traitement d'image inclut :

un premier sous-ensemble (4) de détermination préalable à partir des données d'image d'une image source TEST distordue (SG-2), d'un centre optique (OC^n) et d'une fonction polynomiale ($F^{Nopt/NLast}$) de correction des distorsions radiales autour de ce centre optique,
 un second sous-ensemble (47) incluant une mémoire de stockage du centre optique et de la fonction polynomiale déterminés par le premier sous-ensemble, un bloc de calcul qui applique la fonction polynomiale de correction à chaque adresse de pixel de l'image cible (TI) pour fournir l'adresse d'un point dans l'image source distordue (SI) où trouver une donnée d'intensité à appliquer à l'adresse de départ dans l'image cible, et une seconde mémoire d'image pour le stockage des données de l'image cible (TI) reconstruite.

2. Dispositif de formation d'images selon la revendication 1, dans lequel:

le premier sous-ensemble (4) inclut des blocs de traitement de l'image source TEST, ladite image source TEST étant en forme de grille appelée grille source (SG^0) pour construire une image cible TEST appelée grille théorique (TG^n), lesdits blocs comprenant :

un bloc d'extraction (41) de points de référence (R_k) aux intersections des barreaux de la grille source (SG^0),
 un bloc d'estimation (42) d'une première grille théorique (TG^0) approchée, calculant l'adresse d'un centre (GC^0) et la grandeur d'un pas (GM^0) de ladite première grille théorique (TG^0),
 un bloc d'estimation (43) d'une grille théorique (TG^n) corrigée en distorsion, calculant par itération l'adresse
 d'un centre (GC^n) et la grandeur d'un pas (GM^n) de ladite grille théorique corrigée (TG^n),
 un bloc de calcul (44) d'un polynôme de correction des distorsions radiales fournissant une loi de transforma-
 tion pour passer d'un point de la grille théorique corrigée à l'itération n (TG^n) à un point de référence (R_k) de
 la grille source distordue, loi de transformation à l'itération n ,
 un bloc de calcul (45) d'une erreur de modélisation (E^n) due à la loi de transformation à l'itération n ,
 un bloc de calcul (46) d'une adresse modifiée du centre optique (OC^n) qui minimise l'erreur de modélisation.

3. Procédé pour effectuer des corrections des distorsions optiques géométriques produites dans une image par un système de prise de vue, ce procédé comprenant des étapes préliminaires de :

a) saisie des données et numérisation d'une image source TEST (SG^0), incluant le stockage des données d'intensité de chaque pixel repéré par une adresse dans une matrice bidimensionnelle,
 b) estimation d'un centre optique (OC^n) localisé au mieux au centre des distorsions optiques de l'image source TEST (SG^0) et report de ce centre optique dans une image numérique à construire (TG^n), référencée image TEST cible, représentant l'image source TEST corrigée des distorsions optiques,
 c) estimation d'une fonction polynomiale (F^n) pour faire correspondre à l'adresse d'un pixel (TR_m^n) dans l'image TEST cible corrigée, l'adresse d'un point correspondant (R_k), noté point de référence, dans l'image source TEST distordue, en se fondant sur l'hypothèse de base que les distorsions optiques géométriques dans l'image source TEST sont radiales autour du centre de distorsion, de sorte que lesdits points correspondants (TR_m^n , R_k) sont alignés au mieux avec le centre optique estimé (OC^n).

4. Procédé selon la revendication 3, comprenant en outre dans les étapes préliminaires des étapes itératives de :

d) estimation de la meilleure fonction polynomiale (F^{Nopt}) capable de minimiser, à une itération d'ordre $Nopt$, l'erreur de modélisation (E^n) réalisée sur la localisation des pixels de l'image TEST cible (TG^n) construite à une itération précédente (n) selon l'hypothèse des distorsions radiales autour d'un centre optique (OC^n) estimé à ladite itération précédente,
 e) estimation, à une itération d'ordre $Nlast$, d'un centre optique modifié optimisé (OC^{Nlast}) et réestimation dans ces conditions d'une nouvelle fonction polynomiale ($F^{Nopt(Nlast)}$) capable de minimiser davantage l'erreur de modélisation réalisée sur la localisation des pixels de l'image cible reconstruite selon l'hypothèse des distorsions radiales autour dudit meilleur centre optique (OC^{Nlast}) estimé.

5. Procédé selon la revendication 3, dans lequel les étapes préliminaires sont faites une fois pour toutes, ce procédé comprenant à l'issue des étapes préliminaires, des étapes de :

a₀) saisie des données d'une image source (SI) quelconque distordue par le dispositif de prise de vue, et numérisation et stockage des données d'intensité de chaque pixel,
 f) correction proprement dite des distorsions optiques, en appliquant à une image cible numérique (TI) à construire, la fonction polynomiale (F^n) estimée, de manière à fournir à partir de chaque adresse de cette image cible (TI), une adresse correspondante dans l'image numérique source (SI) distordue où trouver une donnée d'intensité à appliquer à ladite adresse dans l'image cible à construire.

6. Procédé selon la revendication 4, dans lequel les étapes préliminaires sont faites une fois pour toutes, ce procédé comprenant à l'issue des étapes préliminaires, des étapes de :

a₀) saisie des données d'une image source (SI) quelconque distordue par le dispositif de prise de vue, numérisation et stockage des données d'intensité de chaque pixel ;
 f') correction proprement dite des distorsions optiques, en appliquant, à une image cible numérique (TI) à construire, la fonction polynomiale ($F^{Nopt(Nlast)}$) estimée la meilleure, de manière à fournir à partir de chaque adresse dans cette image cible (TI), une adresse correspondante dans l'image numérique source (SI) distordue où trouver une fonction d'intensité à appliquer à ladite adresse dans l'image cible à construire.

7. Procédé selon l'une des revendications 3 à 6, selon lequel :

dans l'étape a) préliminaire de saisie de données et numérisation, l'image source TEST est l'image numérisée d'une grille à mailles rectangulaires dont les barreaux sont parallèles aux lignes et colonnes de pixels, aux erreurs de distorsions optiques près, référencée grille source,
 dans l'étape b) l'estimation d'un centre optique (OC^n) est effectuée de manière itérative à partir d'une itération zéro comprenant la construction d'une première image TEST cible corrigée en distorsion, notée première grille cible (TG^0) au moyen des sous-étapes de :

extraction d'un point par zone d'intersection des barreaux de la grille source, ces points extraits étant notés points de référence (R_k) de la grille source (SG^0),
 estimation d'un point de référence (R_k^0) le plus proche du centre de distorsions de la grille source, report de ce point de référence (R_k^0) dans la première grille cible (TG^0) pour constituer le premier centre de grille (GC^0),
 estimation d'un premier pas de grille (GM^0) pour ladite grille cible (TG^0),
 estimation d'un premier centre optique approximatif (OC^0) pour ladite première grille cible (TG^0), situé en coïncidence avec ledit point de référence (R_k^0) reporté et en coïncidence avec le centre de grille (GC^0).

8. Procédé selon la revendication 7, dans lequel à l'étape d) l'estimation itérative de la meilleure fonction polynomiale (F^{n+1}) comprend l'estimation à l'itération d'ordre zéro d'une première fonction polynomiale (F^0) comprenant les sous-étapes de :

construction des points (TR_m^0) de ladite première grille cible à partir du centre de grille (GC^0) et du pas de grille (GM^0) pour correspondre aux points de référence (R_k) d'intersection des barreaux de grille source (SG^0) mise en correspondance des points de grille (TR_m^0) de la première grille cible (TG^0) et des points de référence (R_k) de la grille source (SG^0) en localisant le centre de grille (GC^0) en coïncidence avec le point de référence (R_k^0) le plus proche du centre de distorsion,
 formation des couples P_k^0 constitués des points de grille (TR_m^0) et des points de référence (R_k) correspondants, de proche en proche à partir du centre vers les bords de la grille cible (TG^0),
 estimation de couples de rayons (X_k^0, Y_k^0) formés de segments joignant le centre optique (OC^0) de la première grille cible (TG^0) et chaque points des couples points de grille cible-point de référence (TR_m^0, R_k),
 calcul de la première fonction polynomiale (F^0) comme celle qui relie le mieux les couples de rayons (X_k^0, Y_k^0) pour respecter l'hypothèse selon laquelle les distorsions sont radiales autour du centre optique connu (OC^0).

9. Procédé selon la revendication 8, dans lequel à l'étape d) l'estimation itérative de la meilleure fonction polynomiale (F^{n+1}) comprend l'estimation à une itération d'ordre $n > 0$, d'une fonction polynomiale (F^n) comprenant les sous-étapes de :

construction d'une grille cible (TG^n) à l'ordre n , ayant un centre optique (OC^n) et des points de grille (TR_m^n) définis par un centre de grille (GC^n) et un pas de grille (GM^n),
 mise en correspondance des points de grille (TR_m^n) de la grille cible (TG^n) et des points de référence (R_k) de la grille source (SG^n) en localisant le centre de grille cible (GC^n) par ses coordonnées déterminées à l'itération précédente,
 formation de couples (P_k^n) de points de grille (TR_m^n)-point de référence (R_k) de proche en proche à partir du centre vers les bords de l'image cible (TG^n),
 estimation des couples de rayons (X_k^n, Y_k^n) formés des segments joignant le centre optique connu (OC^n) et chaque point des couples (TR_m^n, R_k),
 calcul de la fonction polynomiale (F^n) comme celle qui relie le mieux les couples de rayons (X_k^n, Y_k^n) pour respecter l'hypothèse selon laquelle les distorsions géométriques sont radiales autour du centre optique (OC^n).

10. Procédé selon la revendication 9, dans lequel la construction d'une grille cible (TG^n) à l'itération courante (n) comprend les sous-étapes de :

localisation d'un centre optique (OC^n) nouvellement mis-à-jour,
 localisation des points de grille (TR_m^{n-1}) et points de référence (R_k) correspondants constituant des couples (P_k^{n-1}) formés à l'itération précédente ($n-1$),
 estimation des distances géométriques (Δ_k^{n-1}) abscisses des points de grille (TR_m^{n-1}) sur les rayons passant par le centre optique nouvellement mis à jour (OC^n) et par les points de référence correspondants (R_k) des couples (P_k^{n-1}) formés à cette itération précédente ($n-1$),
 estimation d'un critère référencé critère radial Φ^n qui exprime l'hypothèse radiale que la meilleure grille cible

corrigée correspond à la minimisation des distances géométriques (Δ_k^{n-1}),
 minimisation du critère radial Φ^n exprimé en fonction des coordonnées du centre et des composantes du pas
 de la grille à l'itération (n-1), fournissant les coordonnées du centre et les composantes du pas de la grille
 cible à l'itération n.

11. Procédé selon la revendication 10, dans lequel l'étape e) d'estimation du meilleur centre optique (OC^{Nlast}) est
 réalisée dans une boucle d'itération dans laquelle à chaque itération courante (n) la localisation du centre optique
 (OC^n) est modifiée, puis réintroduite dans la construction de la grille cible courante (TG^n) pour la détermination
 d'une nouvelle fonction polynomiale (F^n) et l'estimation de l'erreur de modélisation (E^n) correspondante, la meilleu-
 re localisation du centre (OC^{Nlast}) étant celle qui résulte en l'erreur de modélisation la plus faible correspondant à
 la meilleure fonction polynomiale ($F^{Nopt(Nlast)}$).

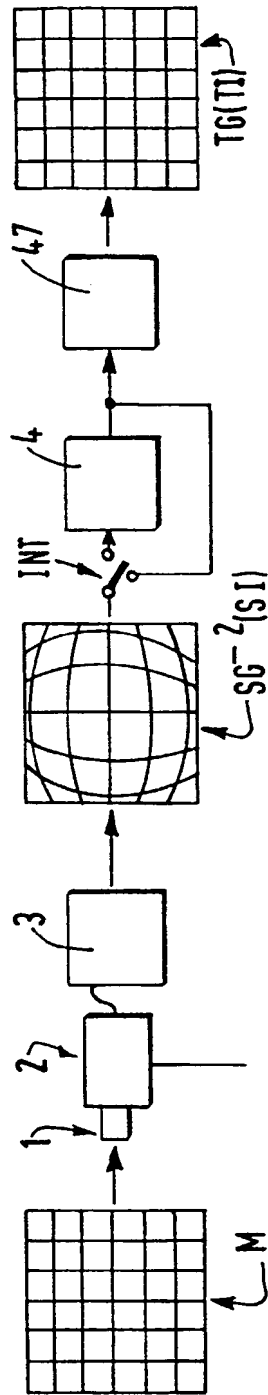


FIG. 1A

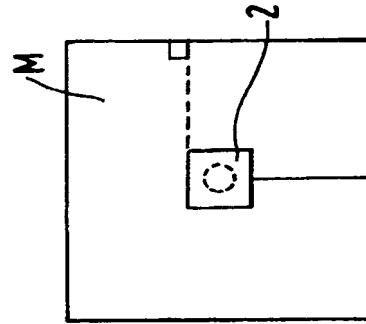


FIG. 1C

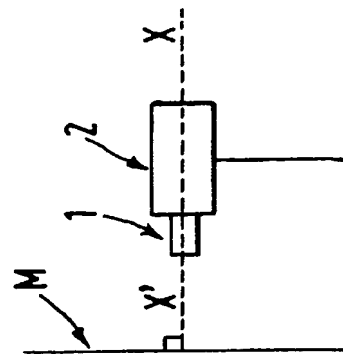


FIG. 1B

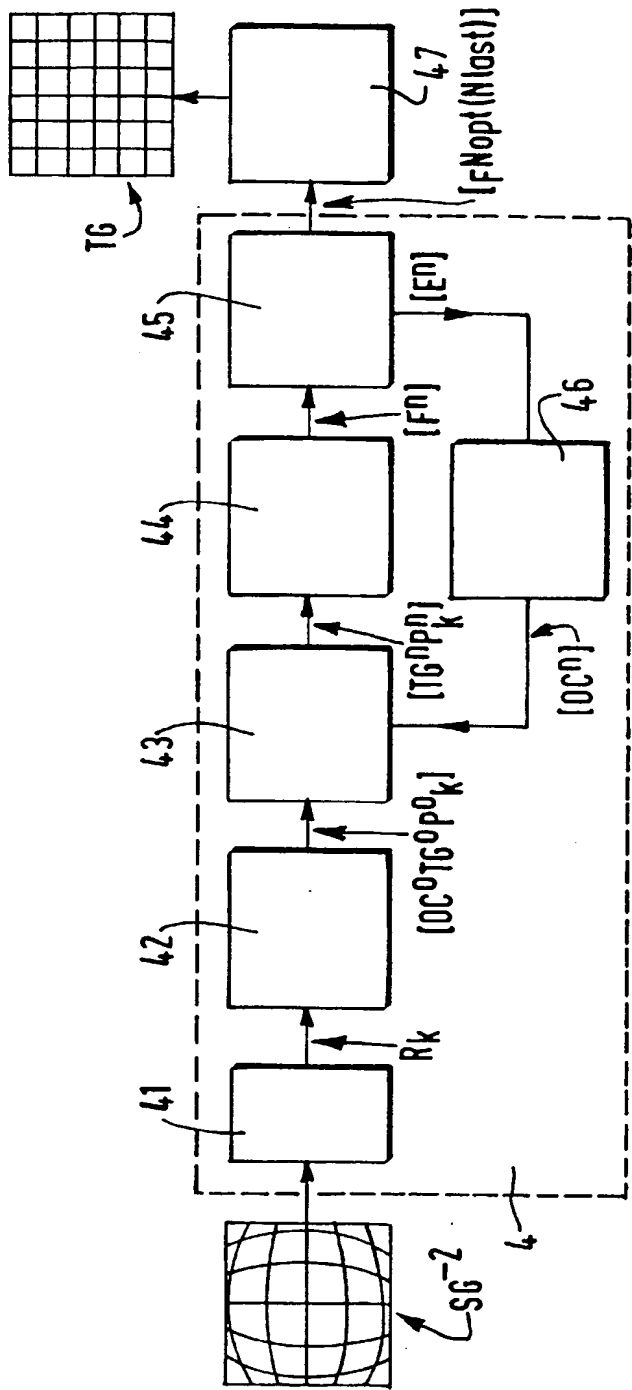


FIG. 2

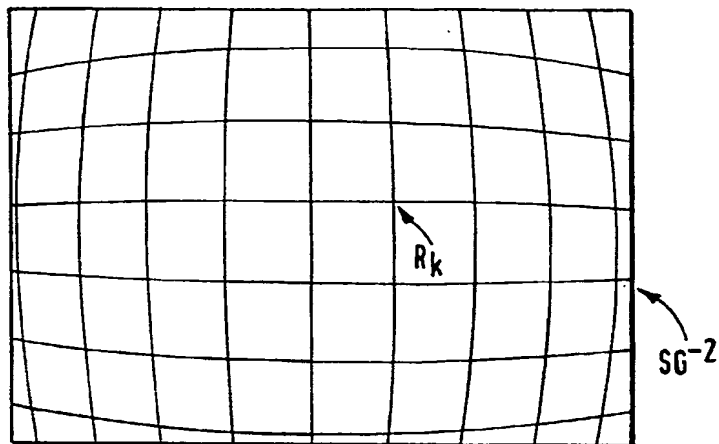


FIG. 3A

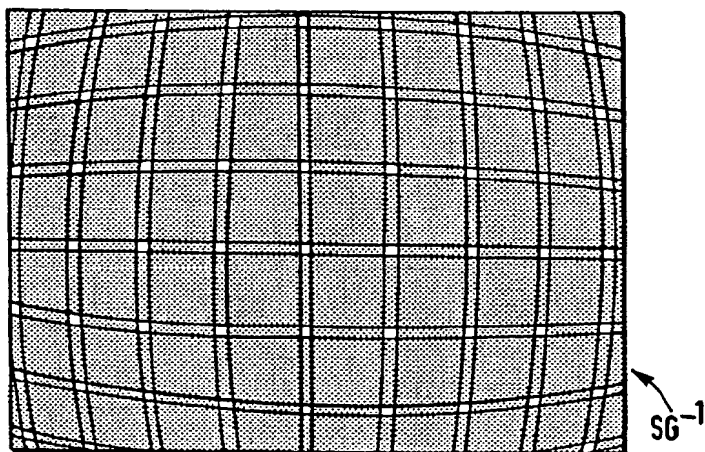


FIG. 3B

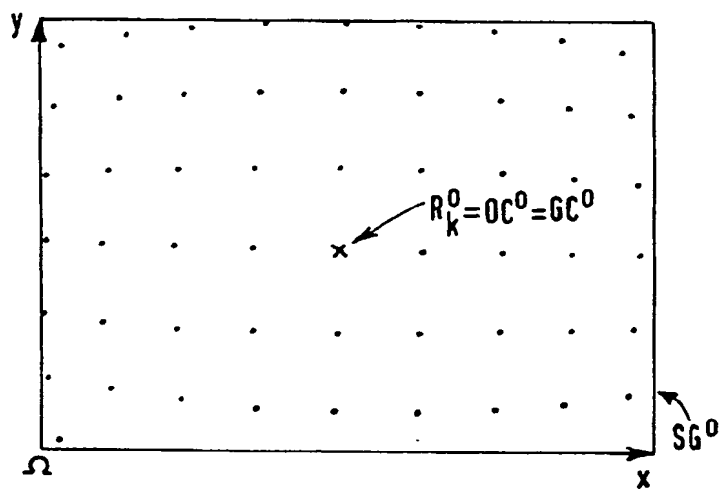


FIG. 3C

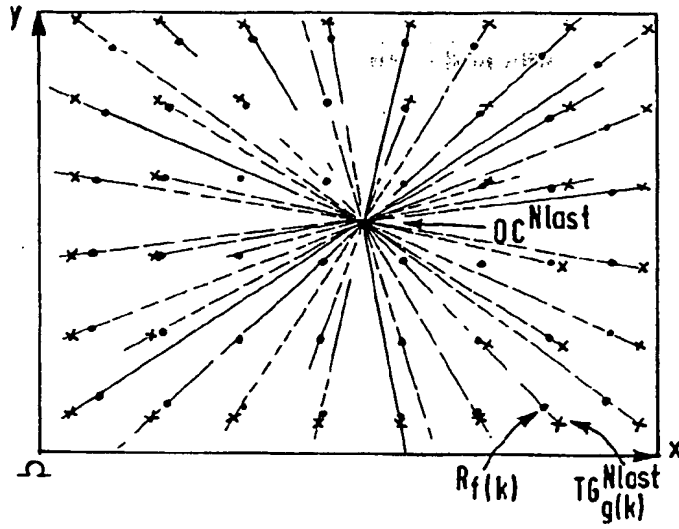


FIG. 3D

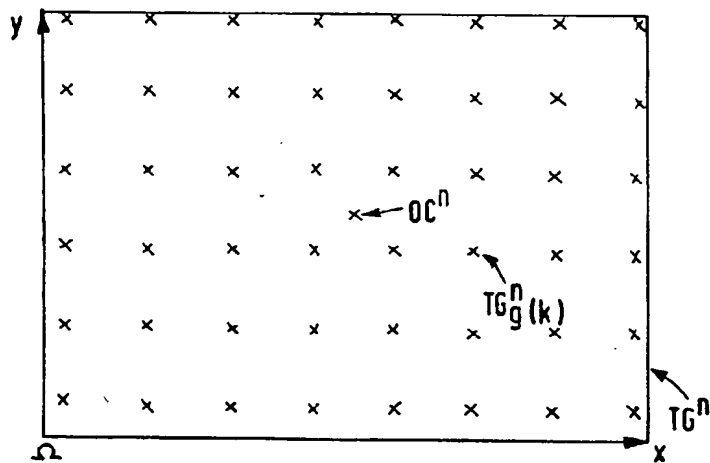


FIG. 3E

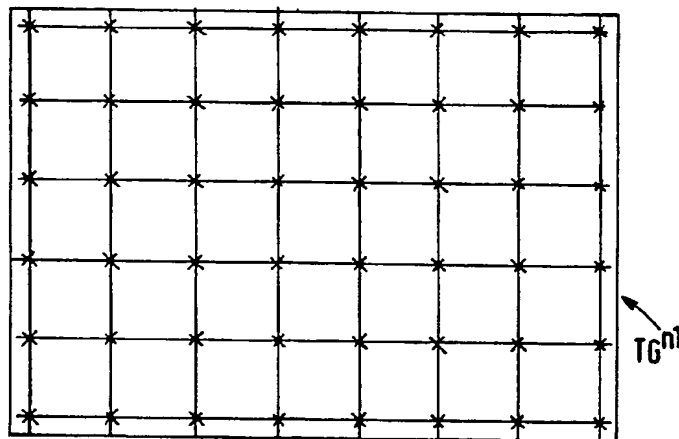


FIG. 3F

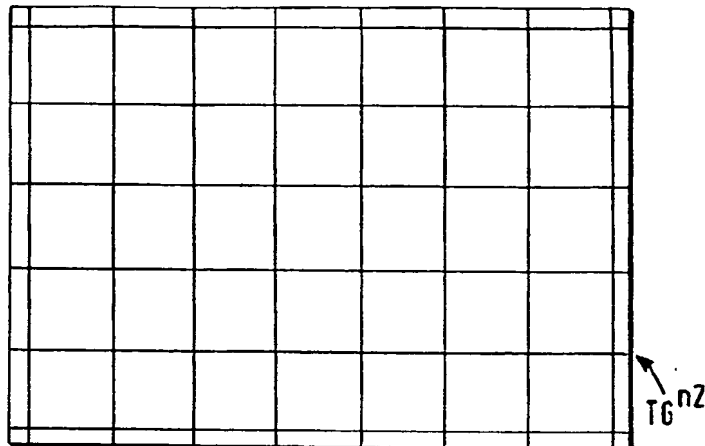


FIG. 3G

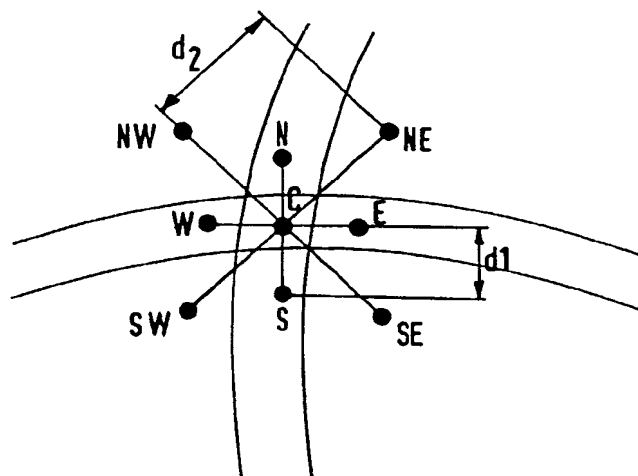


FIG. 4A

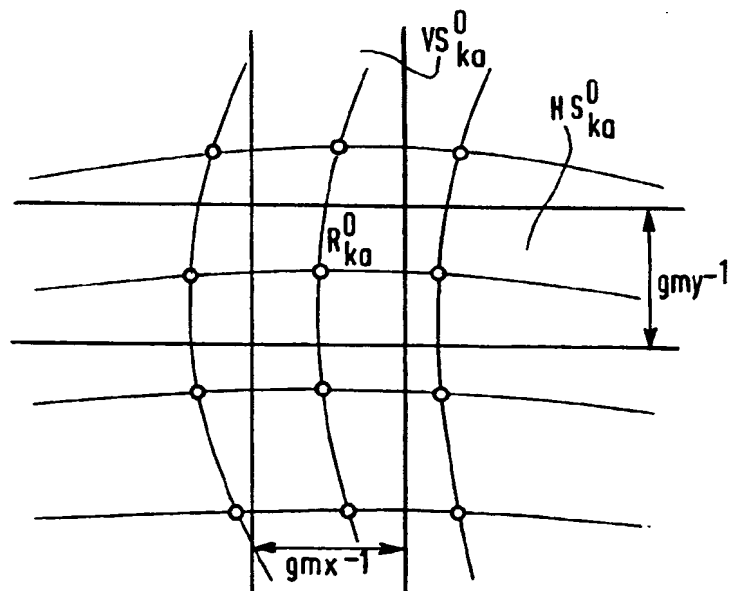


FIG. 4B

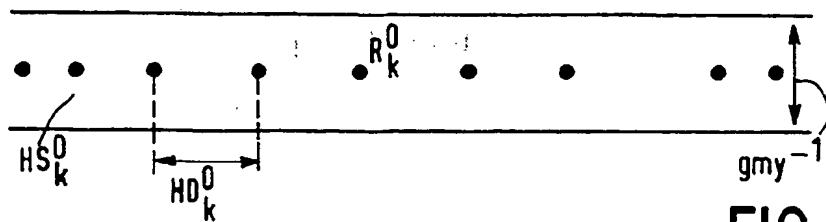


FIG. 4C

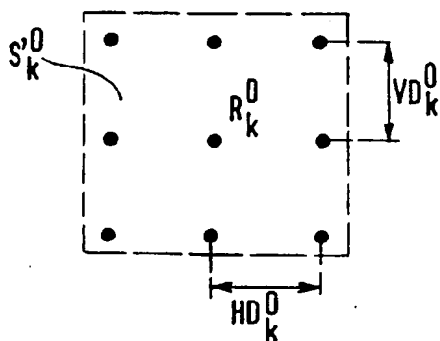


FIG. 4D

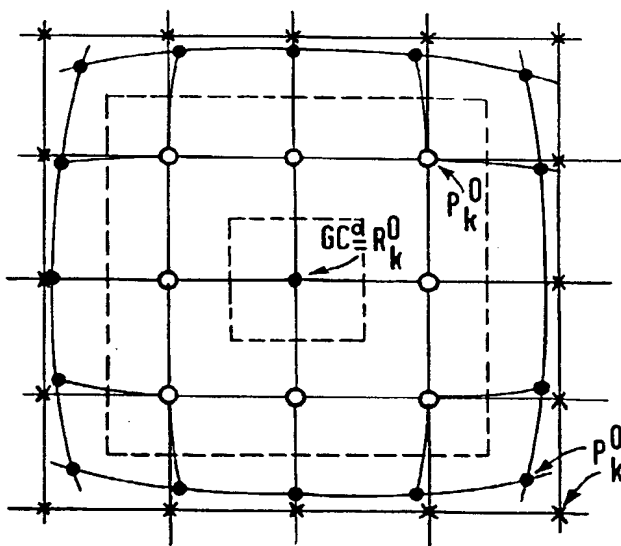


FIG. 4E

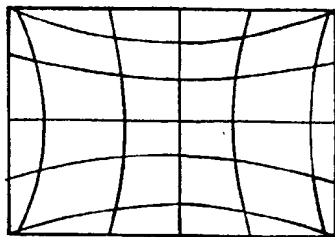


FIG. 5A

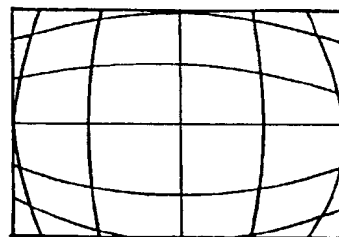


FIG. 5B

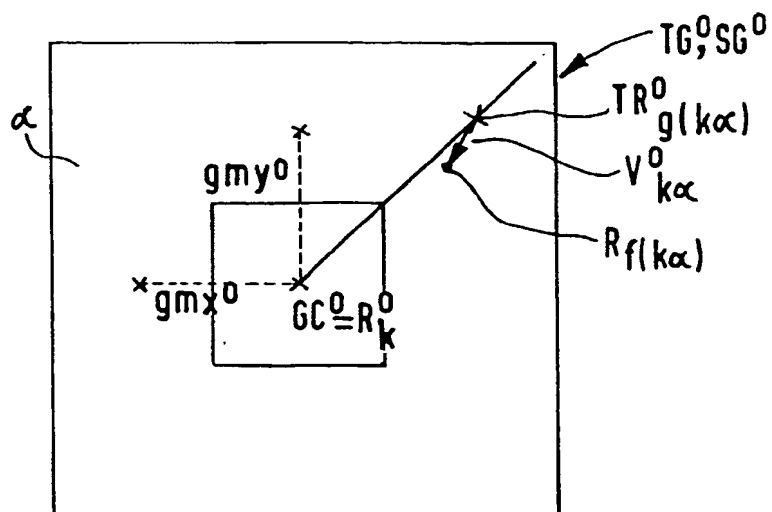


FIG. 6A

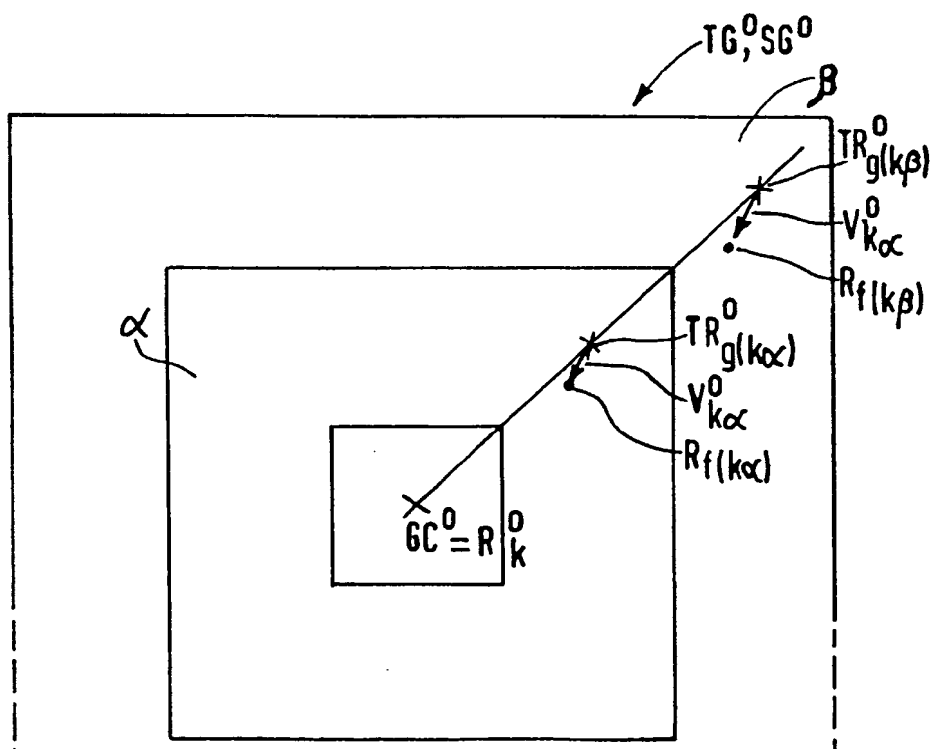
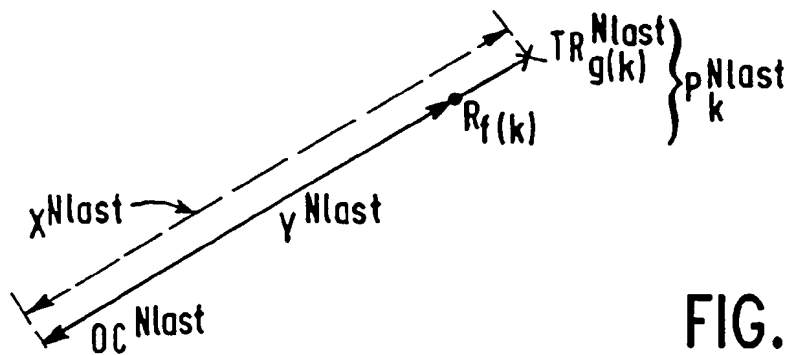
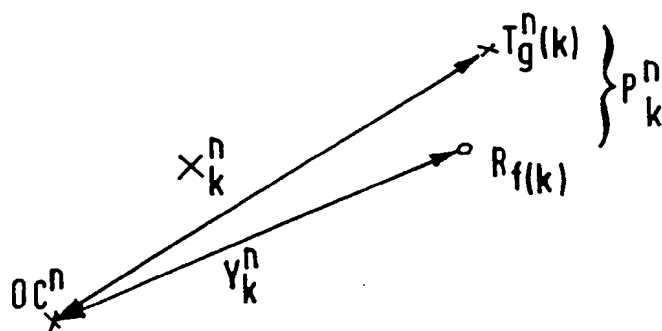
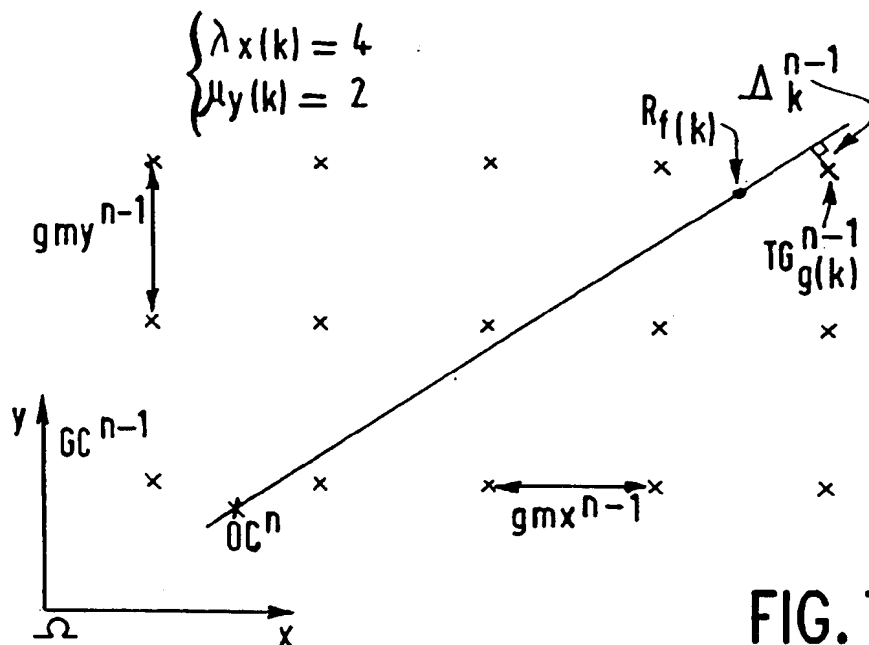


FIG. 6B



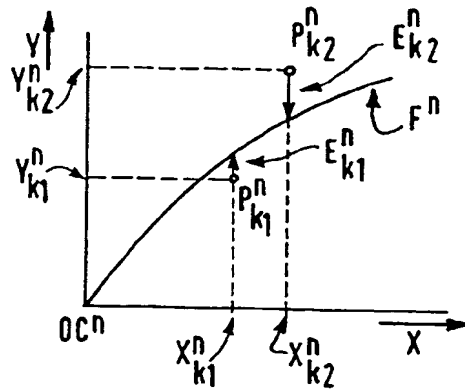


FIG. 8A

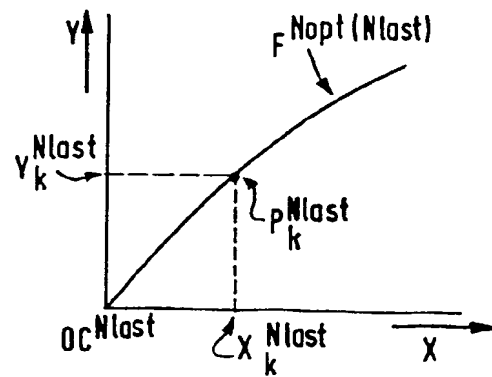


FIG. 8D

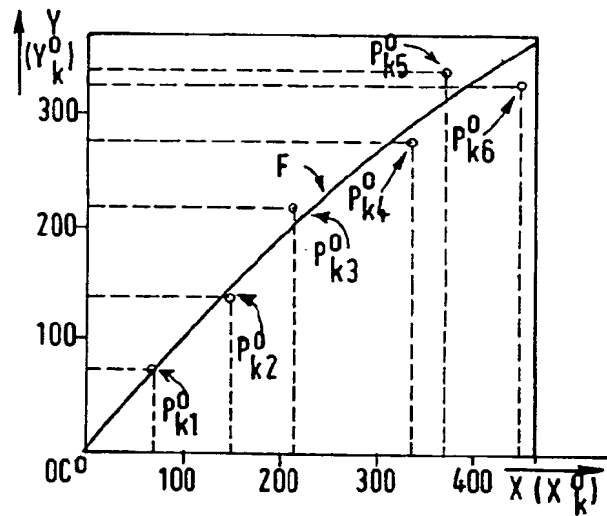


FIG. 8B

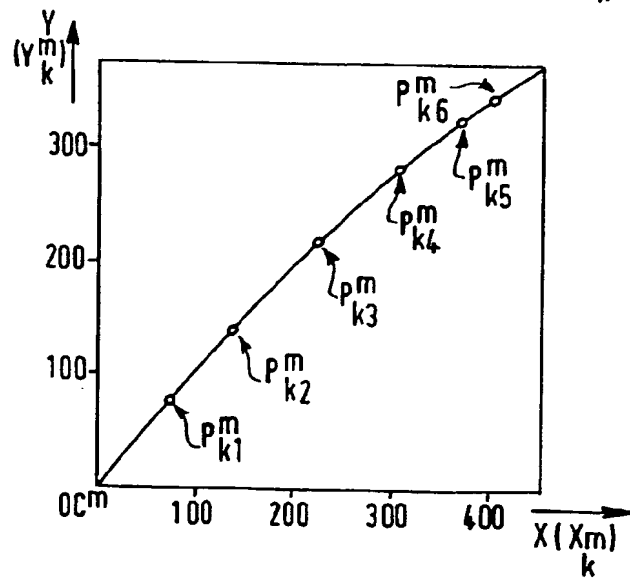


FIG. 8C



Office européen
des brevets

RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numero de la demande
EP 95 20 3550

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Categorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int.Cl.6)
Y	SIGNAL PROCESSING, vol. 17, no. 3, Juillet 1989 NETHERLANDS, pages 191-200, UNSER M. ET AL. 'Iterative Restoration of Noisy Elastically Distorted Periodic Images.' * page 192, colonne de gauche, ligne 35 - ligne 44 * * page 193, alinéa 3 *	1-11	G06T5/00
Y	IEEE TRANSACTIONS ON MEDICAL IMAGING, vol. 11, no. 1, Mars 1992 USA, pages 117-122, SMITH W. E. ET AL. 'Correction of Distortion in Endoscope Images.' * page 117, alinéa II *	1-11	
A	PHOTOGRAMETRIC ENGINEERING, vol. 36, no. 6, Juin 1970 USA, pages 584-588, VAN ROESSEL J. 'Estimating Lens Distortion with Orthogonal Polynomials.' page 585, alinéa "The Orthogonal Polynomial Radial Distortion Model"	1-11	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.Cl.6)
A	EP-A-0 479 618 (TOSHIBA) * abrégé * * page 5, ligne 24 - ligne 44 *	1-11	G06T
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche LA HAYE		Date d'achèvement de la recherche 28 Mars 1996	Examinateur Gonzalez Ordenez, O
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			

EPO FORM 1503 (12.92) (P04007)

THIS PAGE BLANK (USPTO)